



HAL
open science

Le coiffage pulpaire direct sur dents permanentes : données actuelles

Chloe Muller

► **To cite this version:**

Chloe Muller. Le coiffage pulpaire direct sur dents permanentes : données actuelles. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. hal-04517027

HAL Id: hal-04517027

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04517027v1>

Submitted on 22 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ACADÉMIE DE NANCY-METZ
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ D'ODONTOLOGIE DE LORRAINE

Année 2023

N° 12907 C

THÈSE

**POUR LE DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE
DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 5 mai 2023

par

Chloe MULLER

Née le 06/12/1997 à Thionville

**Le coiffage pulpaire direct sur dents
permanentes : données actuelles**

Composition du jury :

Président :

Membres :

Pr Éric MORTIER
Dr Rémy BALTHAZARD
Dr Marin VINCENT
Dr Renaud GIESS

Directeur de thèse :

Pr Éric MORTIER

ACADÉMIE DE NANCY-METZ
UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ D'ODONTOLOGIE DE LORRAINE

Année 2023

N° 12907 C

THÈSE

**POUR LE DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE
DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 5 mai 2023

par

Chloe MULLER

Née le 06/12/1997 à Thionville

**Le coiffage pulpaire direct sur dents
permanentes : données actuelles**

Composition du jury :

Président :

Membres :

Pr Éric MORTIER
Dr Rémy BALTHAZARD
Dr Marin VINCENT
Dr Renaud GIESS

Directeur de thèse :

Pr Éric MORTIER

« Par délibération en date du 11 décembre 1972, la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propre à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation. »

Présidente : Docteur Héléne BOULANGER

Doyen : Docteur Kazutoyo YASUKAWA

Vice-Doyens : Dr Charlène KICHENBRAND – Dr Rémy BALTHAZARD – Dr Marin VINCENT

Membres Honoraires : Dr L. BABEL – Pr. S. DURIVAUX – Pr A. FONTAINE – Pr G. JACQUART – Pr D. ROZENCWEIG - Pr ARTIS

Doyens Honoraires : Pr J. VADOT, Pr J.P. LOUIS

Département odontologie pédiatrique Sous-section 56-01	Mme JAGER Stéphanie	Maître de conférences *
	M. PREVOST Jacques	Maître de conférences
	Mme HERNANDEZ Magali	Maître de conférences *
	M. HAINOT Raphaël	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme HILT Léa	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme HOMBOURGER Morgane	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. MASSON Maximilien	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département orthopédie dento-faciale Sous-section 56-01	M. WATRIN Ferdinand	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	M. VANDE VANNET Bart	Professeur des universités *
	Mme DAMERDJI-BENHABIB Zaheira	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux ass. *
Département prévention, épidémiologie, économie de la santé, odontologie légale Sous-section 56-02	M. FAWAZ Paul	Chef de clinique des universités associé *
	Mme CLÉMENT Céline	Maître de conférences *
	M. BAUDET Alexandre	Maître de conférences *
	Mme CAIONE Mariette	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département parodontologie Sous-section 57-01	M. VEYNACHTER Thomas	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	Mme BISSON Catherine	Professeur des universités *
	M. JOSEPH David	Maître de conférences *
	Mme BERBE Ludivine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
Département chirurgie orale Sous-section 57-01	Mme VITALI Marine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. BRAVETTI Pierre	Maître de conférences *
	Mme GUILLET-THIBAUT Julie	Maître de conférences
	Mme KICHENBRAND Charlène	Maître de conférences *
	Mme PHULPIN Bérengère	Maître de conférences *
	M. CLERC Sébastien	Praticien hospitalier universitaire *
	Mme BECKER Alice	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Mme PEREIRA Laure	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux	
Département biologie orale Sous-section 57-01	Mme EGLOFF-JURAS Claire	Maître de conférences *
	M. MARTRETTE Jean-Marc	Professeur des universités *
	M. YASUKAWA Kazutoyo	Maître de conférences *
Département dentisterie restauratrice, endodontie Sous-section 58-01	M. MORTIER Éric	Professeur des universités *
	M. ENGELS-DEUTSCH Marc	Professeur des universités *
	M. AMORY Christophe	Maître de conférences
	M. BALTHAZARD Rémy	Maître de conférences *
	M. VINCENT Marin	Maître de conférences*
	M. GIESS Renaud	Maître de conférences associé*
	M. DAL MAGRO Claire	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme DAVRIL Jeanne	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	M. LESIEUR François	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. DE MARCH Pascal	Maître de conférences
Département prothèses Sous-section 58-01	Mme CORNE Pascale	Maître de conférences *
	M. SCHOUVER Jacques	Maître de conférences
	Mme VAILLANT Anne-Sophie	Maître de conférences *
	M. HIRTZ Pierre	Enseignant universitaire
	Mme GERBER Caroline	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	M. JONVEAUX Maxime	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme MOUGEL Armande	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. PERRIN Tom	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. SYDA Paul-Marie	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme WILK Sabine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme STRAZIELLE Catherine	Professeur des universités *
Département fonction-dysfonction, imagerie, biomatériaux Sous-section 58-01	Mme MOBY (STUTZMANN) Vanessa	Maître de conférences *
	M. SALOMON Jean-Pierre	Maître de conférences
	M. RITTIE François	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux

Souligné : responsable de département

* temps plein

Mis à jour le 17 février 2023

Remerciements

**À notre président et directeur de thèse,
Monsieur le Professeur Éric MORTIER**

Docteur en chirurgie dentaire
Docteur de l'université Henri Poincaré en physique-chimie
de la matière et des matériaux
Habilité à diriger des recherches
Professeur des universités – praticien hospitalier
Responsable du département de dentisterie restauratrice, endodontie
Chef du service d'Odontologie du CHRU de Nancy

Vous nous faites l'immense honneur de présider notre jury de thèse.

Nous vous remercions infiniment pour votre implication dans ce travail et pour votre grande disponibilité.

Vous êtes toujours à l'écoute et nous transmettez de précieux conseils. Vous êtes grandement impliqué dans tout ce que vous entreprenez.

Veillez trouver ici le témoignage de notre reconnaissance, de notre profond respect et de nos sincères remerciements.

**À notre juge,
Monsieur le Docteur Rémy BALTHAZARD,**

Docteur en chirurgie dentaire
Docteur de l'université de lorraine en science des matériaux
Lauréat de l'académie nationale de chirurgie dentaire
Maître de conférences – praticien hospitalier
Vice-Doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine

Nous vous remercions de faire partie de ce jury de thèse.

Vous êtes très investi pour votre travail, vous avez toujours à cœur de transmettre vos connaissances.

Nous remercions votre implication, votre patience, toujours avec une touche d'humour.

Veillez trouver ici le témoignage de notre sincère reconnaissance.

**À notre juge,
Monsieur le Docteur Marin VINCENT,**

Docteur en chirurgie dentaire
Maître de conférences – praticien hospitalier
Docteur de l'université de Lorraine en mécanique et énergétique
Vice-doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine

Vous nous faites l'honneur d'intégrer ce jury de thèse.

Nous remercions votre bonne humeur quotidienne et votre grande implication dans votre travail.

Veillez trouver ici l'expression de notre reconnaissance.

**À notre juge,
Monsieur le Docteur Renaud GIESS,**

Docteur en chirurgie dentaire
Maître de conférences associé

Nous vous remercions d'encadrer ce travail.

Nous saluons votre dévouement et votre grande pédagogie.

Vous êtes d'une grande gentillesse, accessibilité et disponibilité. Nous vous en remercions grandement.

SOMMAIRE

Liste des figures

Introduction

1. Le coiffage pulpaire direct

- 1.1 Définition
- 1.2 Objectifs
- 1.3 Formation d'un pont dentinaire
- 1.4 Cellules souches pulpaires
- 1.5 Indications
- 1.6 Pulpite réversible et pulpite irréversible

2. Les matériaux de coiffage

- 2.1 Mode d'action
- 2.2 Les ciments tricalciques
- 2.3 L'hydroxyde de calcium
- 2.4 L'utilisation de ciments d'obturation endodontique en tant que matériau de coiffage pulpaire ?

3. Suivi clinique et radiographique d'une dent traitée par coiffage

- 3.1 Succès thérapeutique
- 3.2 L'échec thérapeutique

4. Les particularités du coiffage pulpaire direct sur dents permanentes immatures

- 4.1 Définition
- 4.2 Indications
- 4.3 Objectif du coiffage pour les dents permanentes immatures : l'apexogénèse
- 4.4 Suivi clinique et radiologique d'une dent permanente immature traitée par coiffage

5. Les contre-indications au coiffage direct des dents permanentes

- 5.1 Contre-indications générales
- 5.2 Contre-indications locales

6. Le laser : une thérapeutique alternative ?

Conclusion

Bibliographie

Table des matières

Liste des figures

- Figure 1 : schéma de coiffage pulpaire direct (source : Bérès et coll., 2022)
- Figure 2 : échelle des thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire en fonction des stades de pulpite (source : Boukpepsi et coll., 2020)
- Figure 3 : radiographie rétro-alvéolaire objectivant une lésion carieuse profonde juxta-pulpaire (source : Maturo et coll., 2010)
- Figure 4 : schéma guidant la prise de décision clinique en cas de lésion carieuse profonde (source : Boukpepsi et coll., 2020)
- Figure 5 : effraction pulpaire à la suite d'une éviction carieuse (source : Maturo et coll., 2010)
- Figure 6 : traumatisme avec exposition pulpaire d'une incisive centrale maxillaire chez une jeune patiente de 11 ans (source : Bhat et coll., 2014)
- Figure 7 : (A) Innervation et vascularisation du complexe pulpo-dentinaire. (a) vaisseaux sanguins (bleu et rouge) et fibres nerveuses (jaune) de la chambre pulpaire aux tubulis dentinaires formant le plexus de Raschkow ; (b) faisceau neurovasculaire apical ; (c) faisceau nerveux ; (d) fibre nerveuse amyélinique ; (e) fibres nerveuses myélinisées ; (B) innervation dentaire ; (a) aspect coronal de la chambre pulpaire qui présente une densité importante de terminaisons nerveuses diminuant progressivement au niveau cervical (b) et en direction apicale (c) les terminaisons nerveuses se terminent dans la couche odontoblastique et dans les tubulis dentinaires (source : Iaculli et coll., 2022).
- Figure 8 : composition de divers matériaux à base de silicate de calcium (source : Andrei et coll., 2021)
- Figure 9 : format poudre et liquide du ciment Biodentine (source : dentistrytoday.com)
- Figure 10 : succès à deux ans d'un coiffage pulpaire direct, absence de radioclarité péri-apicale (source : Llana et coll., 2020)
- Figure 11 : échec à 12 mois d'un coiffage pulpaire direct. Apparition de lésions péri-apicales en regard des apex mésiaux et distaux (source : Llana et coll., 2020)
- Figure 12 : schéma de pulpotomie partielle (source : Bérès et coll., 2022)
- Figure 13 : schéma de pulpotomie complète (source : Bérès et coll., 2022)

- Figure 14 : coiffage pulpaire direct au MTA (source : van der Vyver et coll., 2018)
- Figure 15 : suivi radiologique (A) à un an, on observe une croissance radiculaire et un fin pont dentinaire (B) à deux ans (C) à trois ans objectivant la formation radiculaire complète ainsi que la fermeture apicale et (D) à quatre ans (source : van der Vyver et coll., 2018)
- Figure 16 : suivi radiologique d'un coiffage pulpaire direct au MTA (A) radiographie rétro-alvéolaire post-opératoire immédiate, (B) à 2 ans, (C) à 4 ans (D) à 14 ans (source : van der Vyver et coll., 2018)

Liste des abréviations

AAPD : *Academy of Pediatric Dentistry*

AKT : *Protein Kinase B*

AAE : *American Association of Endodontists*

BisGMA : méthacrylate de bis-phénylglycidyle

CBCT : *Cone Beam Computed Tomography*

CSC : ciment silicate de calcium

CSP : cellules souches pulpaire

ERK : *extracellular signal-regulated kinases*

HEMA : hydroxyéthyl méthacrylate

LLLT : *low-level laser therapy*

MAPK : *mitogen-activated protein kinase*

MTA : *mineral trioxide aggregate*

mTOR : *mechanistic target of rapamycin*

PEGDMA : diméthacrylate de polyéthylène glycol

PI3K : phosphatidylinositol 3-kinase

SCAP : cellules souches de la papille apicale

TEGDMA : tri éthylène glycol di méthacrylate

Introduction

La pulpe et la dentine qui forment le complexe dentino-pulpaire, véritable « cœur » de la dent, ont une origine embryologique commune, la papille dentaire de l'ectomésenchyme de la crête neurale (Andrei et coll., 2021).

La dentine est un tissu conjonctif minéralisé. Elle présente une dureté supérieure à l'os et inférieure à l'émail. Elle est essentiellement constituée d'hydroxyapatite de calcium $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ et d'une matrice collagénique (Andrei et coll., 2021).

La pulpe est, elle, un tissu conjonctif mou. Elle se compose de nombreuses cellules telles que des odontoblastes, des fibroblastes et des cellules mésenchymateuses indifférenciées. Celles-ci se situent dans la chambre pulpaire et dans le canal radiculaire. Elles sont protégées et isolées des facteurs extérieurs par la dentine qui entoure la pulpe (Andrei et coll., 2021).

Le tissu pulpaire possède de nombreuses fonctions ; sensorielles, nutritionnelles mais aussi défensives. Sa fonction première est la sécrétion de dentine, via la couche externe de cellules odontoblastiques (Andrei et coll., 2021).

La pulpe est cloisonnée par la dentine. Elle est le support de la vitalité de la dent grâce à l'apport de facteurs essentiels via le foramen apical. Elle joue un rôle capital de maintien de l'intégrité de la dent. Les vaisseaux sanguins fournissent des nutriments et éliminent les déchets grâce au foramen apical. Le réseau neuronal indique la présence de stimuli nocifs via la douleur (Morotomi et coll., 2018).

Le tissu pulpaire présente une faible conformité puisqu'il est enfermé dans un espace clos aux parois dures. Cette faiblesse le rend vulnérable face à certaines agressions, entraînant parfois la nécessité d'un traitement endodontique synonyme de son extirpation. Une dent dépulpée est alors plus fragile qu'une dent vivante, et peut même entraîner une détérioration de la qualité de vie du patient (Morotomi et coll., 2018).

Au cœur de la pulpe se trouvent de nombreuses cellules immunitaires. On y retrouve des cellules dendritiques, des lymphocytes T et des macrophages qui ont pour rôle d'empêcher l'invasion de micro-organismes et d'antigènes (Morotomi et coll., 2018).

La dentine saine peut être perdue en raison d'usure chimique ou mécanique, de lésion carieuse ou encore pour une raison traumatique. C'est alors que les odontoblastes ou les *odontoblast-like* entrent en jeu, en activant la dentinogénèse tertiaire. Ils permettent une forme de réparation de la dent, en réalisant une apposition dentinaire à la surface de la chambre pulpaire (Morotomi et coll., 2018).

Pendant l'odontogénèse et jusqu'à la fin de l'apexogénèse se déroule la phase de formation de la dentine primaire. Elle est le représentant principal de la matrice dentinaire circumpulpaire. La dentine secondaire se forme dans des conditions physiologiques. Elle se fait par un dépôt dentinaire continu une fois l'apexogénèse achevée. Elle a lieu tout le long de la vie de la dent, tant que celle-ci est vitale (Andrei et coll., 2021).

Malgré quelques petites différences, les dentines primaire et secondaire présentent une structure similaire. Elles sont toutes deux tubulaires et composées de dentine intertubulaire et pérítubulaire (Andrei et coll., 2021).

La dentine tertiaire se forme quant-à-elle en réponse à une agression externe, afin de protéger le tissu pulpaire sous-jacent. Elle possède une matrice dystrophique, parfois atubulaire. Elle se forme spécifiquement à l'interface pulpe-dentine, à la suite d'un processus carieux, pathologique ou traumatique. L'intensité des stimuli externes est à l'origine de deux types de dentine tertiaire. On distingue la dentine réactionnelle et la dentine réparatrice. La première est sécrétée en réponse à un stimulus léger. Celui-ci permet la préservation et la stimulation des cellules odontoblastiques post-mitotiques à l'origine de la dentine réactionnelle. La dentine réparatrice est quant-à-elle sécrétée en réponse à un stimulus plus important, comme par exemple une lésion carieuse profonde à évolution rapide. Dès lors, les odontoblastes sont détruits. Un processus complexe débute. Il implique la mitose, la chimiotaxie, la migration, l'adhésion et la différenciation des cellules souches mésenchymateuses qui forment une nouvelle génération de cellules *odontoblast-like*, responsables de la sécrétion de dentine réparatrice (Andrei et coll., 2021).

Ces cellules *odontoblast-like* proviennent du système immunitaire, de la couche cellulaire sous-odontoblastique ou des fibroblastes pulpaires. Leur origine peut

influencer le phénotype cellulaire ainsi que d'autres interactions cellulaires (Andrei et coll., 2021).

La dentine est un réservoir de molécules bioactives. Elle contient des facteurs de croissance, des facteurs neurotrophiques, des neuropeptides ou encore des cytokines. Ces molécules sont séquestrées dans la matrice extra-cellulaire pendant la dentinogénèse. Elles peuvent être solubilisées dans des conditions pathologiques, c'est-à-dire carieuses, iatrogènes ou traumatiques (Andrei et coll., 2021)

Ces molécules bioactives sont des molécules de signalisation. Elles conduisent à la phosphorylation des récepteurs et la signalisation des voies de transduction après liaison. Elles sont essentielles à la dentinogénèse. On retrouve les voies de signalisation MAPK (mitogen-activated protein kinase), PI3K (phosphatidylinositol 3-kinase), AKT (protein kinase B) et mTOR (mechanistic target of rapamycin). Celles-ci sont engagées dans la prolifération cellulaire, la migration, l'adhésion et l'apoptose (Andrei et coll., 2021).

Appartenant à la famille MAPK, p38 MAPK est impliqué dans les processus de réparation et de régénération. En effet, il a pour rôle central d'activer l'activité sécrétoire des odontoblastes (Andrei et coll., 2021).

L'effraction pulpaire est un incident qui est susceptible de se produire fréquemment en pratique quotidienne. Aujourd'hui, les thérapeutiques prioritairement mises en place ont pour objectif de préserver la vitalité pulpaire tant que possible. Pour cela, les biomatériaux désormais utilisés améliorent la réponse biologique de la pulpe avec pour but la formation d'une barrière minéralisée néoformée protégeant alors cette dernière. Notre travail se propose de revenir sur les différents matériaux de coiffage pulpaire à disposition des praticiens et d'en décrire les propriétés. Au-delà du protocole opératoire du coiffage pulpaire direct, nous reviendrons également sur le suivi adapté d'une dent ayant bénéficié d'un coiffage tout comme nous évoquerons les contre-indications, tant locales que générales, d'une telle thérapeutique. La spécificité du traitement d'une dent permanente immature sera également abordée. Enfin, nous nous interrogerons quant à la possibilité d'une alternative au coiffage direct à proprement parler notamment par le biais de l'utilisation de lasers.

1. Le coiffage pulpaire direct

1.1 Définition

La dentisterie restauratrice a pour but ultime de conserver la vitalité du tissu pulpaire. Parmi les différentes thérapeutiques conservatrices disponibles, le coiffage pulpaire direct peut être utilisé lors d'une effraction pulpaire punctiforme, en l'absence d'inflammation de la pulpe (Manaspon et coll., 2021).

Dans une perspective clinique plus précise, on peut situer le coiffage pulpaire direct entre le coiffage pulpaire indirect et la pulpotomie (Chicarelli et coll., 2021).

Le coiffage pulpaire direct est une thérapeutique minimalement invasive qui vise à préserver la vitalité de la dent en facilitant la cicatrisation du tissu pulpaire et en induisant une néoformation de tissu minéralisé (Bui et Pham, 2021).

Cette thérapeutique repose sur le fait que le tissu pulpaire a un potentiel naturel de réparation tissulaire qui conduit à la formation de dentine réparatrice. Le coiffage pulpaire direct est indiqué afin d'éviter ou de repousser au maximum le traitement endodontique, en particulier pour les dents permanentes immatures (Bui et Pham, 2021).

Les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire dépendent en grande partie du statut pulpaire. Malheureusement, la détermination de ce dernier s'avère complexe. En effet, il n'existe pas de corrélation directe et précise entre les signes cliniques et les symptômes, les tests de sensibilité pulpaire, les examens radiologiques et les analyses histologiques du tissu pulpaire (Raouf et coll., 2022).

Le coiffage pulpaire direct consiste en l'application d'un matériau bioactif au contact direct de la plaie pulpaire (figure 1). Ensuite, la mise en place d'un matériau de restauration coronaire étanche est primordiale.



Figure 1 : schéma de coiffage pulpaire direct (source : Bérès et coll., 2022)

Il existe deux classes d'exposition pulpaire. La première, dite de classe I, est d'origine non carieuse, c'est-à-dire traumatique ou iatrogène. Dans ce cas la pulpe n'est pas enflammée. La seconde est dite de classe II : elle est causée par une lésion carieuse profonde, donc une présence de bactéries et de toxines bactériennes, entraînant alors une inflammation pulpaire (Boukpepsi et coll., 2020).

Le coiffage pulpaire par un biomatériau est un acte opératoire codifié. Techniquement, il ne s'agit pas d'un acte compliqué. Cependant, de nombreux facteurs entrent en jeu quant au pronostic de succès ou d'échec thérapeutique. En effet, la prise de décision et les conditions de sa réalisation clinique déterminent en grande partie la réussite du traitement (Boukpepsi et coll., 2020).

Cette thérapeutique repose sur le principe du traitement de la plaie pulpaire dans un environnement tissulaire le plus sain possible. La lutte permanente contre la contamination bactérienne est un impératif opératoire. Le coiffage direct s'effectue après un curetage non sélectif de la dentine cariée ayant entraîné une exposition de la pulpe. Il ne doit se faire que si la dentine environnante est saine, et que la pulpe exposée ne présente pas de signe d'infection (Boukpepsi et coll., 2020).

Si l'une de ces conditions n'est pas remplie, d'autres procédures plus invasives sont alors indiquées.

Cette lecture clinique permet au chirurgien-dentiste de distinguer les cas où un coiffage pulpaire direct est indiqué. Il permet aussi de s'engager, si requis, dans des procédures plus invasives, telles que la pulpotomie ou la pulpectomie.

1.2 Objectifs

La pulpe est un tissu non minéralisé possédant un nombre important de fonctions. Elle est à l'origine de l'induction comme de la formation de dentine. Elle possède également des rôles de nutrition, de défense et de sensibilité nerveuse. Il est donc primordial de maintenir la vitalité pulpaire afin qu'elle puisse assurer ses divers rôles (Zhu et coll., 2015).

Le coiffage direct permet d'augmenter l'espérance de vie d'une dent atteinte sur son arcade en maintenant la vitalité pulpaire en favorisant la cicatrisation pulpaire grâce à la formation d'une barrière minéralisée néoformée (Komabayashi et coll., 2015 ; Boukpepsi et coll., 2020). Cicatrisation pulpaire et réparation dentinaire sont donc les deux objectifs recherchés du coiffage direct (Zeater et coll., 2022). D'un point de vue clinique, deux résultats sont les plus importants : obtenir après la réalisation d'un

coiffage pulpaire direct une vitalité pulpaire à long terme, et ce, en dehors de toute symptomatologie (Zhu et coll., 2015).

Lorsque les conditions biologiques et cliniques sont réunies, une pulpe exposée est capable de maintenir sa vitalité grâce à la formation d'un pont dentinaire qui isole la brèche dentinaire : la pulpe ainsi isolée de l'environnement dentinaire retrouve son état de santé et ses fonctions.

La préservation tissulaire est au cœur de la dentisterie contemporaine. C'est dans cette optique que l'on peut affirmer que la meilleure obturation endodontique est la pulpe : dès que cela est possible et compatible avec la situation clinique, il faut privilégier les thérapeutiques conservatrices des fonctions pulpaires (Clot et coll., 2013).

Les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire offrent de nombreux avantages par rapport aux thérapeutiques non conservatrices. En effet, une pulpe maintenue vivante permet de conserver la structure de la dent contribuant aussi à sa résistance mécanique. De plus, les mécanismes de défense provenant de la pulpe comme la proprioception et la sensibilité dentaire sont maintenus (Raouf et coll., 2022).

Le tissu pulpaire, outre son rôle nutritif, est également capable de détecter les potentiels agents pathogènes. La perte de sa vitalité augmentera considérablement la fragilité à ce titre de la dent concernée (Yang et coll., 2016).

Préserver la vitalité pulpaire est donc un objectif en soi qui passe par un traitement de stimulation activant le complexe dentino-pulpaire en générant la production de dentine réparatrice au niveau de la zone pulpaire atteinte. Par ailleurs, le coiffage pulpaire direct protège potentiellement aussi la pulpe de l'infiltration bactérienne et de l'éventuelle toxicité des matériaux de restauration. Il favorise également la cicatrisation de la couche de dentine réparatrice (Andrei et coll., 2021).

L'objectif du coiffage pulpaire direct en tant que traitement de régénération est d'induire la différenciation des cellules *odontoblast-like* qui vont entraîner la formation de dentine tertiaire au niveau du site d'exposition avec une réorganisation de la structure tissulaire. Ainsi est scellée la communication entre la pulpe et la cavité orale en agissant telle une barrière (Paula et coll., 2019).

1.3 Formation d'un pont dentinaire

La sécrétion de dentine réparatrice entraîne la formation d'un tissu minéralisé. Dès lors, les odontoblastes du site d'exposition sont détruits et remplacés par des cellules

nouvellement différenciées, les *odontoblast-like*. Cela implique la migration de cellules progénitrices vers le site lésé (Paula et coll., 2019).

Les odontoblastes sont les cellules responsables de la dentinogénèse. On les trouve à la périphérie du tissu pulpaire. Ils peuvent être détruits lors de stimuli externes sévères, comme c'est le cas dans les lésions carieuses profondes. Alors, le recrutement de cellules progénitrices et l'induction de la différenciation par les odontoblastes peuvent avoir lieu conduisant en réalité à la formation de cellules *odontoblast-like* (Nie et coll., 2021).

Le coiffage pulpaire direct utilise les capacités régénératrices des cellules pulpaires via l'utilisation de matériaux bioactifs en engendrant la formation d'un tissu minéralisé ou pont dentinaire, alternative plus conservatrice au traitement endodontique dans les cas d'une effraction pulpaire, ne pouvant se produire qu'en présence d'une pulpe atteinte réversiblement et sans signe d'inflammation (Nie et coll., 2021).

Les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire et les matériaux de coiffage pulpaire améliorent les réponses biologiques. Ils favorisent la dentinogénèse tertiaire en stimulant l'activité sécrétoire des odontoblastes (Andrei et coll., 2021).

1.4 Cellules souches pulpaires

La découverte des cellules souches pulpaires a été un véritable tournant en dentisterie. Celle-ci a ouvert un nouveau champ de recherche, offrant de nombreuses possibilités aux chirurgiens-dentistes. En effet, ces cellules souches pulpaires sont capables de se différencier en cellules *odontoblast-like* et donc de produire de la dentine réparatrice.

Une étude *ex vivo* d'une dent présentant une lésion pulpaire a montré une prolifération accrue de cellules souches pulpaires (CSP) dans la zone périvasculaire, suivie d'une migration vers le site lésé. Cette prolifération n'a pas été observée lors d'une simple lésion dentinaire (Rombouts et coll., 2016). Cela signifie que les signaux d'activation et de migration des CSP ne sont initiés qu'en présence d'une lésion pulpaire incluant une couche odontoblastique endommagée. C'est alors particulièrement intéressant en cas de lésions carieuses profondes ou de préparations dentaires à l'aide d'instruments rotatifs à l'origine de lésions pulpaires.

La migration des CSP vers le site lésé est une procédure complexe. Elle implique de nombreux processus non encore entièrement élucidés à ce jour. Tout d'abord, les CSP doivent être recrutées à partir de leur niche. La littérature rapporte l'implication de

nombreuses molécules de signalisation. Ces dernières proviennent de différentes sources. En effet, elles peuvent être libérées par la matrice dentinaire ou être produites par les cellules pulpaires. Le microenvironnement local influence directement ces sources. Ce dernier varie en présence d'une lésion carieuse, de l'état inflammatoire, en cas de blessure mécanique ou encore suite à l'application de matériaux de restauration (Rombouts et coll., 2016).

Bien que ces molécules de signalisation soient impliquées dans le recrutement des CSP, elles peuvent être impliquées dans d'autres processus tels que la différenciation ou l'inflammation.

Il existe un lien étroit entre l'inflammation et la régénération tissulaire. Le tissu pulpaire n'est pas une exception. En effet, le microenvironnement d'une pulpe saine diffère de celui d'une pulpe enflammée. L'état inflammatoire provoque la génération de divers signaux nécessaires au processus de régénération. En effet, interleukine 1 bêta (IL-1 β) est présente dans le tissu pulpaire enflammé et permet d'induire la sécrétion de *monocyte chemoattractant protein 1* (MCP-1). Ce dernier stimule la régénération pulpaire (Rombouts et coll., 2016).

La molécule *high-mobility group box 1* (HMGB-1) est connue notamment pour son rôle en situation inflammatoire et pour son potentiel chimiotactique. Elle est sécrétée en condition d'inflammation par les macrophages, les cellules dendritiques et les monocytes. Sa présence provoque une hausse de production de cytokines pro-inflammatoires (Rombouts et coll., 2016).

L'expression de HMGB-1 au sein du tissu pulpaire enflammé a été observée dans les régions nucléaires et cytoplasmiques des fibroblastes, des cellules endothéliales inflammatoires et vasculaires. D'autre part, un effet chimiotactique a été observé via une réorganisation de F-actine. Cette dernière, sous l'action de HMGB-1, s'accumule en périphérie des cellules pulpaires. Ceci conduit à une hausse du récepteur médiant l'effet chimiotactique de HMGB-1 au sein du tissu pulpaire enflammé. Enfin, il a été démontré que cette molécule favorise la prolifération et la différenciation des cellules souches pulpaires en odontoblastes (Rombouts et coll., 2016).

De nombreux matériaux de coiffage, tels que les ciments à base de silicate de calcium, ont influé positivement le processus de régénération du complexe dentino-pulpaire. Cela est dû à la libération d'ions calcium connus pour leur capacité à stimuler la formation de tissu dur. Ces ciments libèrent également des ions silicium qui permettent d'induire la différenciation des cellules souches pulpaires en odontoblastes.

Il est suggéré que ces ions silicium agissent via les canaux calciques et la signalisation de *mitogen-activated protein kinase* (MAPK) et *extracellular signal-regulated kinases* (ERK). En plus de la différenciation odontoblastique, les biomatériaux peuvent également stimuler la migration cellulaire (Rombouts et coll., 2016).

Les ciments *Mineral Trioxide Aggregate* (MTA) permettent la migration précoce et à court terme des cellules souches de la papille apicale (SCAP). Le calcium ainsi libéré est responsable de l'augmentation de la migration cellulaire, tout comme cela a été démontré pour les cellules souches dérivées de la moelle osseuse. Le MTA et l'hydroxyde de calcium sont capables de mobiliser des molécules bioactives séquestrées dans la matrice dentinaire qui peuvent contribuer à leurs effets de stimulation de la migration. Par ailleurs, le ciment Biodentine® induit la sécrétion de TGFβ-1 par les fibroblastes pulpaire attirant secondairement les cellules souches pulpaire (Rombouts et coll., 2016).

D'autre part, certains matériaux ont démontré des effets anti-migratoires. À titre d'exemple, les matériaux à base de résine de type hydroxyéthyl méthacrylate (HEMA) diminuent la migration des CSP. Cette dernière diminue la sécrétion de *fibroblast growth factor 2* (FGF-2) par les cellules pulpaire pouvant expliquer une diminution de la migration des CSP. Le microenvironnement local influe la réponse pulpaire aux matériaux à base de résine. Il faut par exemple tenir compte de la privation de nutriments.

Une diminution concentration-dépendante de la prolifération et de la migration des CSP a été observée lors d'une exposition au tri éthylène glycol di méthacrylate (TEGDMA). La minéralisation est également retardée lors d'exposition à des concentrations sous-toxiques de cette résine (Rombouts et coll., 2016).

1.5 Indications

Lorsque l'on entreprend une thérapeutique de conservation de la vitalité pulpaire, il est essentiel de connaître le niveau d'inflammation de la pulpe. Différents tests sont à disposition du praticien, bien qu'aucun ne soit entièrement fiable. On y retrouve le test thermique ou encore le test électrique. Ceux-ci vont nous guider sur l'état pulpaire en fonction du type de douleur décrit. Il faut chercher si cette douleur est spontanée ou provoquée, rémanente ou non. L'interrogatoire du patient permet de déterminer si elle cède aux antalgiques ou encore son moment de survenue (Boukpepsi et coll., 2020).

Le diagnostic pulpaire s'établit grâce à la somme des éléments recueillis lors de l'anamnèse, de l'examen clinique et radiologique. Il faut ajouter les réponses obtenues lors des tests de vitalité pulpaire (figure 2). Il est essentiel de retenir toutefois que ces tests rendent compte de signes cliniques parfois en retard sur la dégradation histologique effective.

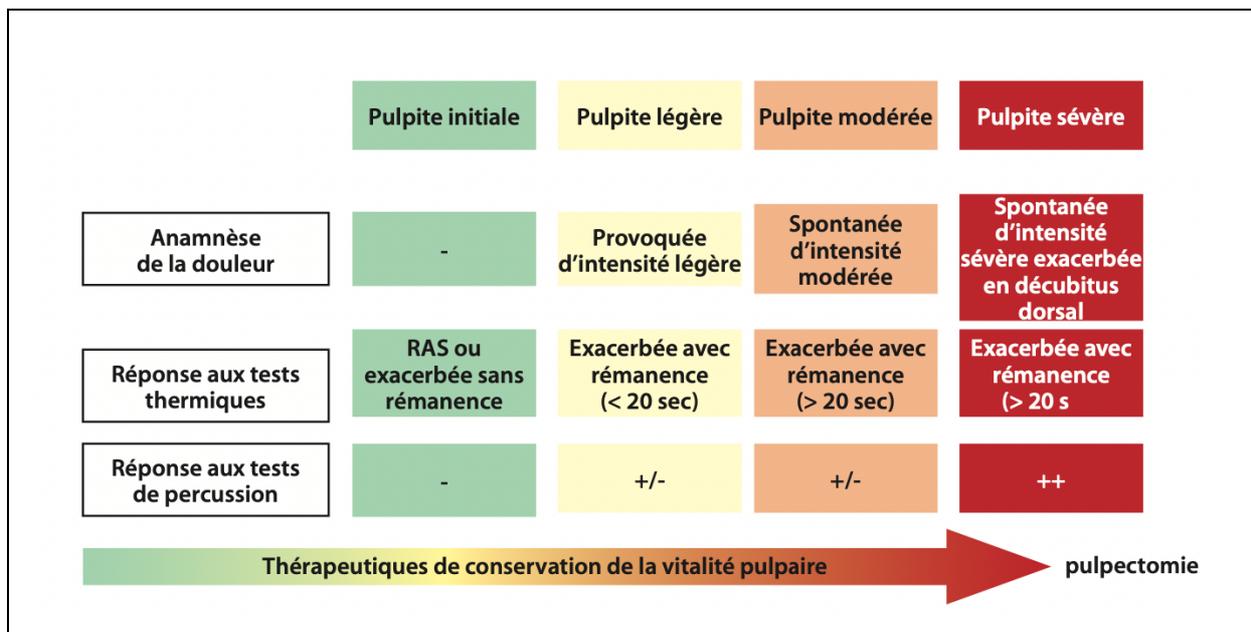


Figure 2 : échelle des thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire en fonction des stades de pulpite (source : Boukpepsi et coll., 2020)

L'examen visuel de la plaie pulpaire est l'autre paramètre décisif dans la prise de décision thérapeutique. Cet examen vise à observer l'apparence du tissu pulpaire exposé. On recherche s'il est sain, hémorragique ou ulcéré afin d'apprécier son degré d'inflammation. Cette donnée peropératoire est indispensable. Elle permet de confirmer l'indication d'un coiffage, d'une pulpotomie ou d'une pulpectomie si l'inflammation pulpaire est sévère (Boukpepsi et coll., 2020).

Les trois causes principales de l'exposition pulpaire sont les facteurs mécaniques, les lésions carieuses ainsi que les traumatismes dentaires. Préserver la vitalité pulpaire dans ces situations lorsque cela est encore possible est important pour la viabilité, la nutrition, l'innervation et la défense immunitaire de l'organe dentaire.

Le coiffage pulpaire direct est un traitement performant dans les cas d'exposition pulpaire mécanique ou traumatique. Toutefois, la notion d'envahissement bactérien au

cours ou suite à ces expositions reste un élément déterminant dans le succès du coiffage direct. Ainsi, dans le cas de lésions carieuses juxta-pulpaire (figure 3), la pulpe est infectée par des bactéries et leurs toxines, assombrissant potentiellement le pronostic du coiffage direct même si l'évaluation clinique de la pulpe a pu paraître favorable (Komabayashi et coll., 2015).



Figure 3 : radiographie rétro-alvéolaire objectivant une lésion carieuse profonde juxta pulpaire (source : Maturo et coll., 2010)

Selon l'*American Association of Endodontists* (AAE), les indications du coiffage pulpaire direct sont les suivantes :

- exposition mécanique d'une pulpe cliniquement vivante et asymptomatique,
- obtention d'une hémostase,
- possibilité d'un contact direct entre le matériau de coiffage et la pulpe après exposition pulpaire,
- survenue de l'exposition pulpaire en présence d'un champ opératoire,
- maintien d'un scellement adéquat de la restauration coronaire,
- prévenir le patient d'un possible futur traitement endodontique en cas d'échec du coiffage (Komabayashi et coll., 2015).

Différents facteurs cliniques entrent en jeu quant à la décision de réalisation d'un coiffage pulpaire direct. Il y a des facteurs préopératoires, tels que l'âge du patient et

le statut inflammatoire pulpaire. Il y a aussi un facteur peropératoire essentiel qui est l'obtention, ou non, d'une hémostase (Clot et coll., 2013).

Concernant l'âge du patient, on admet en général qu'une pulpe jeune a un meilleur pronostic qu'une pulpe plus âgée. Certains travaux ont objectivé que le taux de succès chez les jeunes patients était supérieur à celui obtenu chez les patients plus âgés après un coiffage direct (Clot et coll., 2013). Toutefois, c'est somme toute plus l'âge biologique de la pulpe que l'âge civil du patient qui est à prendre en ligne de compte : cette évaluation biologique est parfois difficile à mener. Une pulpe ayant accumulé différentes agressions présente un vieillissement prématuré se traduisant par une réduction des odontoblastes, une atrophie cellulaire ainsi qu'une fibrose. Il semble logique que ces pulpes aient alors un potentiel réparateur amoindri (Clot et coll., 2013). Ainsi, l'âge civil a de fait une influence quant au taux de succès de la thérapeutique puisque plus le patient est âgé, plus sa pulpe a potentiellement subi des agressions. En conséquence, les patients âgés de plus de 40 ans ont potentiellement un plus faible taux de succès que les patients jeunes expliqué par la senescence pulpaire. Ainsi, le volume pulpaire se réduisant, le nombre de cellules pulpaires disponibles va aussi en diminuant. Au fil du temps, la pulpe subit des modifications réduisant ses capacités de réparation. Les cellules progénitrices voient leur potentiel de différenciation diminué. Plus une pulpe a subi d'agressions, plus elle est donc « vieille » d'un point de vue histologique (Boukpepsi et coll., 2019).

Le pronostic des thérapeutiques mises en œuvre lors d'une exposition pulpaire est grandement dépendant du statut inflammatoire de la pulpe. Celui-ci est primordial dans la décision de la conservation de la vitalité pulpaire. Toutefois, l'évaluation clinique de l'inflammation pulpaire n'est pas entièrement fiable. Elle repose sur des éléments diagnostiques ayant une faible corrélation avec le statut physiopathologique pulpaire. Actuellement, il n'existe pas d'outils diagnostiques fiables mesurant le seuil critique entre une pulpite réversible et irréversible. Cependant, plus la symptomatologie initiale est prononcée, c'est-à-dire plus elle est ancienne et intense, plus la conservation pulpaire est aléatoire (figure 4). *In fine*, l'évaluation réelle de l'inflammation pulpaire ne se fait que lors de son exposition (Clot et coll., 2013).

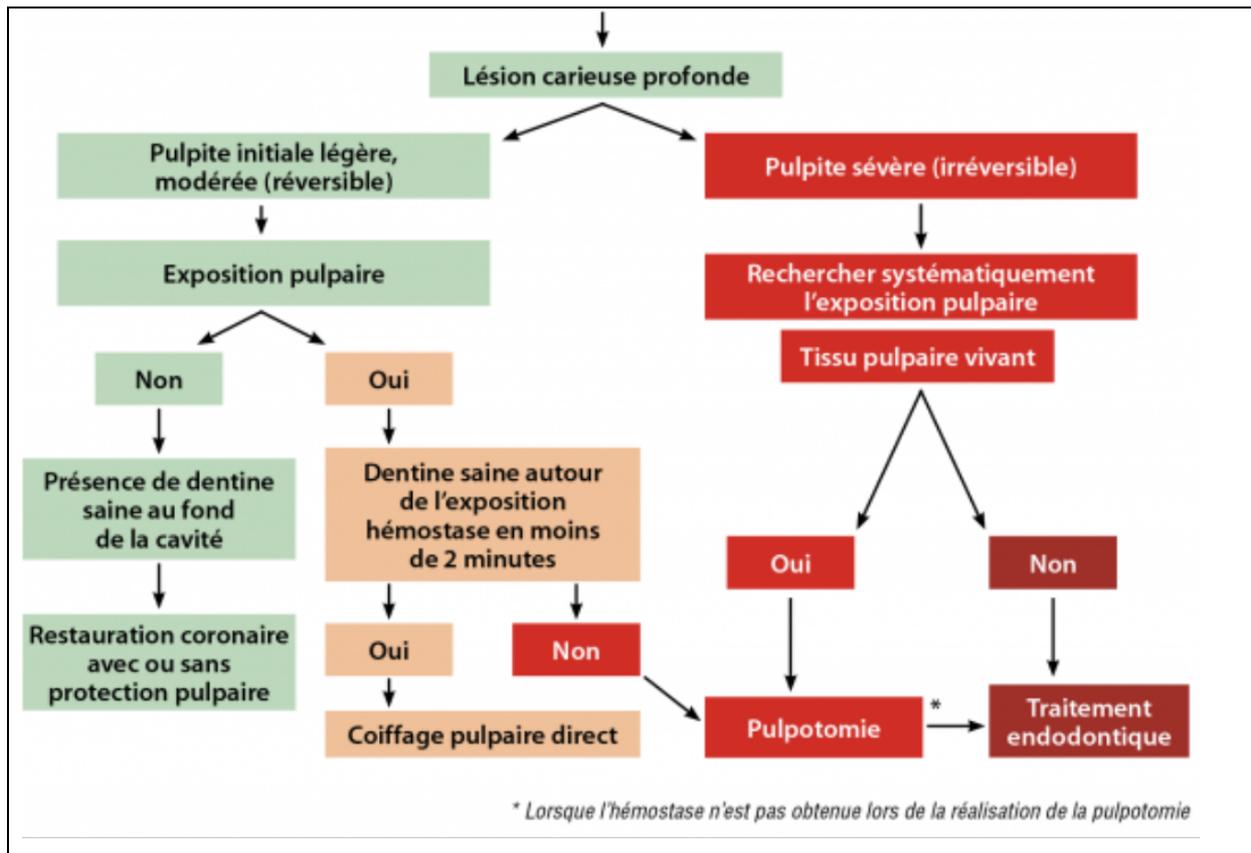


Figure 4 : schéma guidant la prise de décision clinique en cas de lésion carieuse profonde (source : Boukpepsi et coll., 2020)

L'exposition pulpaire provoque un saignement limité, sensé s'arrêter spontanément si le tissu pulpaire est sain. Plus l'inflammation est élevée, plus la congestion augmente, plus le saignement est difficile à tarir. Il est alors difficile d'évaluer la profondeur de l'inflammation pulpaire posant problème quant à l'indication du coiffage ou de la pulpotomie. L'évaluation peropératoire permet de confirmer que la pulpe est peu ou non inflammatoire, et qu'elle peut être conservée en l'état. La quantité et la persistance d'un saignement sont des paramètres concrets pour le praticien. Une exposition sous forme de point sanglant corrélée à une hémostase obtenue en deux voire trois minutes est une indication de coiffage pulpaire direct. Si le saignement est abondant, et qu'une hémostase ne peut être obtenue, il est préférable de passer à une pulpotomie, voire à une pulpectomie (Clot et coll., 2013).

Les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire sont généralement acceptées en tant qu'approche minimalement invasive. Jusque récemment, l'indication de ces thérapeutiques conservatrices était une pulpite réversible sans pathologie péri-apicale.

Ces stratégies alternatives moins invasives pourraient désormais être utilisées pour traiter une pulpite, même irréversible (Tran et coll., 2021).

De nombreuses études cliniques et biologiques ont montré qu'une pulpe de dent mature exposée à la suite d'une lésion carieuse est capable d'être régénérée. Ces études ont également montré que les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire ne devraient pas être limitées seulement aux dents jeunes ou asymptomatiques. Par conséquent, une approche plus conservatrice de maintien de la vitalité pulpaire a été proposée pour les dents en pulpite irréversible. Le succès de cette approche dépend de deux facteurs : la capacité de guérison de la pulpe vitale restante et la biocompatibilité de l'agent de coiffage utilisé (Tran et coll., 2021).

1.5.1 Effraction pulpaire lors d'une éviction carieuse

Le curetage d'une lésion carieuse profonde consiste en l'élimination totale du tissu infecté et des micro-organismes pathogènes entraînant possiblement la disparition de toute la dentine suffisamment minéralisée entre la lésion carieuse et la pulpe. Il y a donc un risque important d'entraîner une exposition pulpaire (figure 5) (Clot et coll., 2013).



Figure 5 : effraction pulpaire à la suite d'une éviction carieuse (source : Maturo et coll., 2010)

1.5.2 Lésions carieuses profondes juxta pulpaire

En cas de lésion carieuse à progression relativement lente, les molécules qui initialement atteignent la pulpe sont capables d'induire une régénération dentinaire.

La dentine peut alors être régénérée grâce aux odontoblastes localisés en périphérie du tissu pulpaire et responsables de la synthèse dentinaire. Les odontoblastes peuvent réguler leur activité sécrétoire et produire une fine couche de dentine réactionnelle. Cette couche montre de nombreuses similitudes avec les dentines primaires et secondaires et contribue à la protection pulpaire (Tran et coll., 2021).

La synthèse de dentine réactionnelle peut se faire via des petites quantités de cytokines pro-inflammatoires. Elle peut se faire aussi par des molécules biologiquement actives, telles que *transforming growth factor* (TGF) ou *bone morphogenic protein* (BMP), responsables de l'induction de la différenciation des odontoblastes embryonnaires. Mais la formation de dentine réactionnelle est inhibée par l'inflammation (Tran et coll., 2021). Ainsi, en réponse à une attaque sévère comme une lésion carieuse à évolution rapide, les odontoblastes primaires meurent sous cette dernière. Les toxines bactériennes libérées par la dentine déminéralisée et la génération locale de médiateurs pro-inflammatoires seraient responsables de leur mort (Tran et coll., 2021). Cependant, si les conditions deviennent propices, c'est-à-dire si la lésion carieuse est stoppée ou contrôlée, les cellules progénitrices à l'intérieur de la pulpe sont activées. Cette activation permet de cibler le site de l'attaque et d'induire la différenciation en cellules *odontoblast-like*. Ces cellules déposent une matrice de dentine tertiaire ou réparatrice, à un rythme apparemment similaire à celui de la dentinogénèse primaire. Cliniquement, cela se traduit par la formation d'un pont dentinaire (Tran et coll., 2021).

1.5.3 Traumatisme avec exposition pulpaire

Principalement retrouvées dans le cadre de l'urgence, les fractures coronaires amélo-dentaires impliquant une exposition pulpaire restent moins fréquentes que celles n'exposant pas la pulpe. Lors de cette consultation d'urgence, plusieurs informations sont essentielles au praticien. Afin d'adapter sa prise en charge à la situation clinique, un examen clinique ainsi que les circonstances de temps du traumatisme guident la décision clinique. Une fracture coronaire est dite compliquée lorsqu'elle concerne l'émail, la dentine mais aussi la pulpe (Clot et coll., 2013).

- Dents permanentes matures

Les traumatismes dentaires impliquant le tissu pulpaire peuvent être traités par une thérapeutique de maintien de la vitalité pulpaire à deux conditions. D'une part, il faut que l'exposition pulpaire soit minime, d'autre part, il faut que le traumatisme soit récent et que le patient consulte le plus rapidement possible, augmentant ainsi considérablement le taux de succès de la prise en charge (Clot et coll., 2013).

- Dents permanentes immatures

Chez le jeune patient, une dent traumatisée présentant une édification radiculaire incomplète se doit d'être maintenue vivante si les conditions cliniques le permettent. En effet, le but ultime est de permettre l'apexogénèse ; créer un pont dentinaire et obtenir une croissance radiculaire physiologique. Le coiffage pulpaire direct est indiqué si le traumatisme engendre une exposition pulpaire minime, soit inférieure à 1 mm. L'autre facteur décisif est le délai de consultation depuis la survenue du traumatisme. Celui-ci ne doit pas excéder 24 heures. En effet, ces conditions sont essentielles pour que le tissu pulpaire ne présente pas d'inflammation (Clot et coll., 2013).

A contrario, si le délai de consultation est supérieur à 24 heures ou si la dent présente des signes de nécrose pulpaire, la vitalité pulpaire ne pourra être maintenue. Par exemple, une dent à réponse positive au test de percussion ou présentant une radio clarté apicale à la radiographie doit être traitée par les techniques d'apexification (Clot et coll., 2013).

Les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire sont généralement le traitement de choix pour les dents permanentes immatures traumatisées (figure 6). En effet, le traitement a de grandes chances de succès car on vient coiffer une pulpe saine (Van der Vyer et coll., 2018).

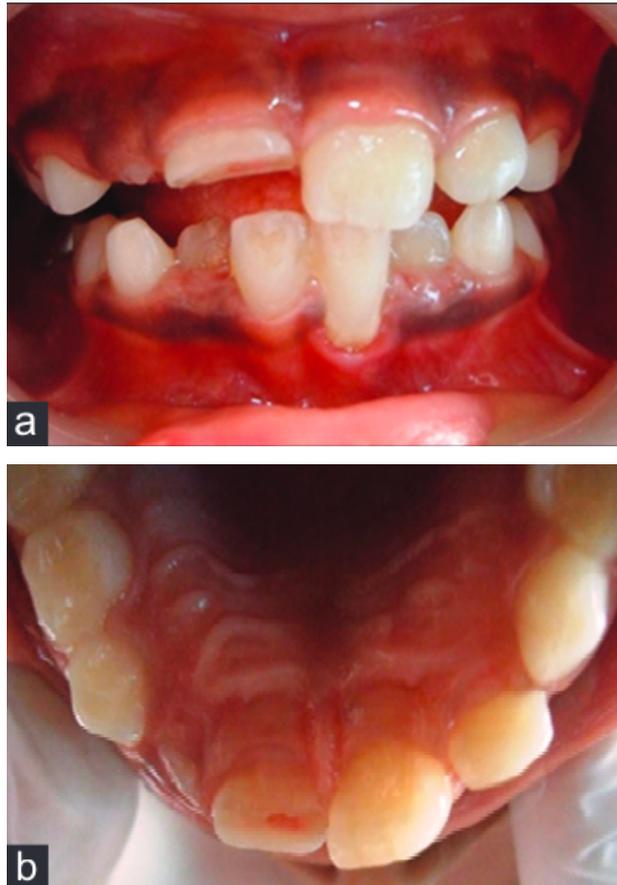


Figure 6 : traumatisme avec exposition pulpaire d'une incisive centrale maxillaire chez une jeune patiente de 11 ans, (a) vue vestibulaire (b) vue occlusale (source : Bhat et coll., 2014)

1.5.4 Exposition pulpaire lors d'une préparation dentaire

Ce type d'incident est assimilé à un acte iatrogène. Une évaluation préopératoire clinique et radiographique de la proximité pulpaire devrait néanmoins pouvoir le prévenir. D'autre part, le recours à des préparations dentaires moins invasives est également un moyen d'éviter ces incidents. Il est possible qu'une effraction pulpaire survienne accidentellement en dentine saine. Cela peut avoir lieu lors d'une préparation cavitaire ou périphérique. Dans ce contexte, une invasion bactérienne est peu probable et la situation pulpaire favorable. Toutes les conditions sont donc réunies à la mise en œuvre d'une thérapeutique de coiffage pulpaire direct. Sur le plan biologique, une nécrose pulpaire n'est pas causée par l'exposition pulpaire en elle-même (Clot et coll., 2013).

1.6 Pulpite réversible et pulpite irréversible

La douleur pulpaire provient de deux voies nerveuses distinctes ; les fibres A-delta ($A\delta$) myélinisées de faible calibre et les fibres C amyéliniques (figure 7). Les fibres $A\delta$ myélinisées de petit diamètre (1 à 5 μm) ont une vitesse de conduction moyenne, de l'ordre de 5 à 40 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Elles réagissent à une stimulation intense, essentiellement d'origine mécanique mais aussi thermique voire chimique. Les fibres C, elles, ont un diamètre plus faible encore, de l'ordre de 0,5 à 1 μm , et présentent une vitesse de conduction plus lente encore, de l'ordre de 0,5 à 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Représentant 80% des fibres afférentes, elles sont limitées à la transmission des influx douloureux en lien avec des stimulations nociceptives intenses d'origine thermique (Iaculli et coll., 2022).

Les fibres $A\delta$ myélinisées de petit diamètre sont responsables de la première douleur ressentie lors de l'application de la stimulation, il s'agit d'une douleur aiguë et tout à fait bien localisée comme celle d'une piqûre brève. Les fibres C sont responsables d'une douleur plus diffuse, agaçante, mal localisée comme celle d'une brûlure.

C'est la vitesse de conduction différentielle des deux types de fibres $A\delta$ et C qui explique le ressenti douloureux : d'abord une douleur aiguë, vive et précise au niveau de la blessure suivie d'une douleur plus diffuse et sourde. La douleur rapide qui disparaît relativement rapidement provient de la transmission de l'influx dans les fibres $A\delta$ tandis que la douleur lente, plus persistante, provient de la transmission dans les fibres C. La douleur rapide emprunte un circuit monosynaptique plus direct que le circuit polysynaptique de la douleur lente (Iaculli et coll., 2022).

La douleur dentaire transmise par les fibres A-delta est généralement déclenchée par les tests de vitalité pulpaire. *A contrario*, la douleur issue des fibres C est généralement associée à une inflammation pathologique de la pulpe. En l'absence de stimuli externes, la douleur liée à un tissu enflammé ou blessé peut survenir spontanément. Actuellement, la gravité de l'inflammation pulpaire ne peut être évaluée cliniquement que via un examen des tissus durs et mous, avec des réponses subjectives du patient au test de sensibilité pulpaire et avec un examen radiologique. Le degré de cette inflammation est souvent déterminé après l'application d'un stimulus froid. Ce dernier peut induire une réponse exagérée et persistante due à la sensibilisation des fibres C et de l'hypersensibilité induite par l'inflammation. Cependant, compte tenu de ces critères diagnostiques, une évaluation quantitative de la douleur permettant la

différenciation fiable d'une inflammation réversible ou irréversible n'est pas possible. D'un point de vue biologique, la différence entre la réversibilité ou l'irréversibilité est liée à des niveaux d'expression spécifiques de médiateurs inflammatoires *in situ*. Outre le fait que la douleur soit le symptôme majeur d'une infection ou d'une inflammation pulpaire, ni sa présence ni son intensité ne correspond précisément à l'étendue de l'atteinte pulpaire ; ni à la gravité de l'état histopathologique (Iaculli et coll., 2022).

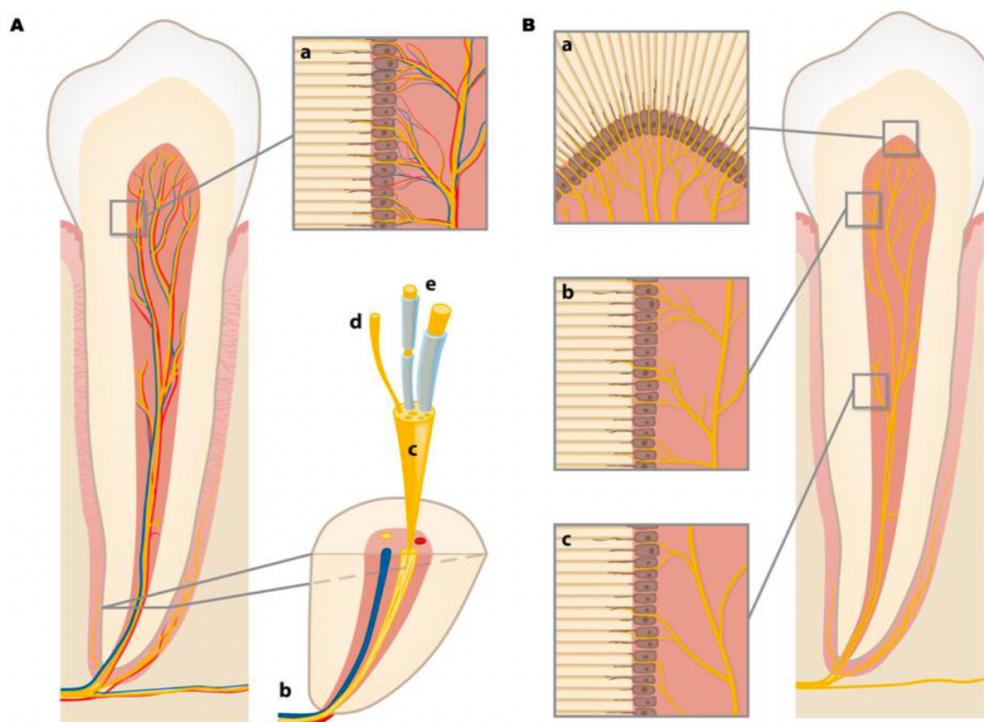


Figure 7 : (A) Innervation et vascularisation du complexe pulpo-dentinaire. (a) vaisseaux sanguins (bleu et rouge) et fibres nerveuses (jaune) de la chambre pulpaire aux tubulis dentinaires formant le plexus de Raschkow ; (b) faisceau neurovasculaire apical ; (c) faisceau nerveux ; (d) fibre nerveuse amyélinique ; (e) fibres nerveuses myélinisées ; (B) innervation dentaire ; (a) aspect coronal de la chambre pulpaire qui présente une densité importante de terminaisons nerveuses diminuant progressivement au niveau cervical (b) et en direction apicale (c) les terminaisons nerveuses se terminent dans la couche odontoblastique et dans les tubulis dentinaires (source : Iaculli et coll., 2022)

2. Les matériaux de coiffage

Certaines caractéristiques sont essentielles pour qu'un biomatériau puisse être utilisé lors d'un coiffage pulpaire direct : ainsi, un pH élevé, une activité antimicrobienne et une libération d'ions calcium sont nécessaires (Paula et coll., 2019). Le matériau se doit aussi d'être bioactif, c'est-à-dire qu'il doit être capable de stimuler et de moduler un tissu. Il doit également être durable dans le temps et présenter la capacité d'avoir des échanges interfaciaux avec les tissus environnants. En conséquence, au cours du coiffage pulpaire direct, lorsque le matériau bioactif entre en contact avec les fluides tissulaires, il doit libérer des ions calcium. Ces derniers peuvent alors interagir avec les tissus avoisinants et promouvoir ainsi leur régénération. L'accent a été mis sur le développement de matériaux bioactifs et biocompatibles capables de promouvoir la régénération, plutôt que la réparation, des tissus pulpaire et péri-radicaux (Zafar et coll., 2020).

Par ailleurs, le matériau de coiffage est placé au contact direct du tissu pulpaire exposé. Il a alors pour but d'être une véritable barrière physique entre le tissu pulpaire et la cavité orale. Il permet ainsi de réduire une potentielle irritation voire une infection pulpaire. Il permet également la guérison pulpaire grâce à l'induction de dentine réparatrice (Manaspon et coll., 2021).

Par l'application d'un matériau biocompatible, les thérapeutiques de conservation de la vitalité pulpaire ont deux buts. Le premier est de favoriser la différenciation des cellules progénitrices de tissus minéralisés. Le deuxième est la formation d'une barrière minéralisée. Celle-ci protège alors la pulpe des micro-infiltrations et favorise ainsi sa cicatrisation (Reis et coll., 2021).

Pour atteindre ces objectifs, un certain nombre de propriétés est requis. Elles incluent une faible toxicité, une bonne stabilité dimensionnelle, un potentiel d'adhésion, une facilité de manipulation et une radio-opacité suffisante. Elles comprennent également l'absence de potentiel carcinogène et génotoxique (Reis et coll., 2021).

Biocompatibilité, propriété antibactérienne, capacité à induire la cicatrisation tissulaire, et capacité à sceller la lésion sont donc les maîtres-mots s'agissant des matériaux de coiffage pulpaire (Paula et coll., 2019).

Ils doivent être capables de former une barrière étanche contre les bactéries. Ils doivent maintenir la vitalité pulpaire, et ainsi entraîner la formation de dentine réparatrice. Les matériaux bioactifs doivent aussi pouvoir libérer du fluor et adhérer à la dentine ainsi qu'aux matériaux de restaurations coronaires. Ils doivent être en

mesure de supporter les forces de mastication. Enfin, ils doivent être bactériostatiques et bactéricides (Priti et coll., 2019).

La notion fondamentale à retenir concernant les ciments minéraux à base de silicate de calcium est leur bioactivité favorisant la formation d'hydroxyapatite, la cicatrisation pulpaire, et la formation de dentine réparatrice. En fonction des propriétés de chacun des matériaux constituant cette famille, les indications peuvent en être différentes (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018).

Les matériaux sont composés de di/tri/tetra silicate de calcium avec un mécanisme de base impliquant un processus d'hydratation. Celui-ci entraîne la formation de phases cristallines et lixiviat (Zafar et coll., 2020).

2.1 Mode d'action

La réaction de prise d'un ciment à base de silicate de calcium (CSC) est l'hydratation. Lors de celle-ci, des sous-produits d'hydratation peuvent se former et se libérer. La plupart des CSC engendre la formation d'hydroxyde de calcium et la lixiviation des ions hydroxyles et calcium. Les ions hydroxyles ainsi libérés augmentent fortement le pH du tissu sous-jacent permettant la formation d'une fine couche nécrotique entre le tissu vivant restant et l'agent de coiffage (Giraud et coll., 2019).

Cette zone nécrotique protège alors les cellules pulpaires vitales sous-jacentes du pH alcalin du biomatériau. Elle permet également à ces cellules d'exercer leurs fonctions de cicatrisation et de régénération. Le pH alcalin assure une activité antimicrobienne. La fine couche nécrotique devient secondairement calcifiée. Ensuite, de la dentine tertiaire se forme à partir de cellules souches pulpaires stimulées et différenciées aboutissant à la formation d'un pont dentinaire protecteur. Les ions calcium stimulent la différenciation des cellules souches pulpaires. Ils contribuent ainsi à la formation de ce pont dentinaire. Ils augmentent la formation de nodules de matrice minéralisée (Giraud et coll., 2019).

Une surface bioactive se forme par la nucléation du phosphate de calcium et de la formation subséquente d'apatite. Cette couche d'apatite stimule la différenciation cellulaire, l'ostéogenèse, la réparation tissulaire et la cémentogénèse. Les ions de silicium sont un autre élément pouvant jouer un rôle dans la formation de ce pont dentinaire. Leur libération stimule la formation d'un os jeune via la stimulation des

ostéoblastes. En cas de coiffage pulpaire direct, la présence des ions de silicium dans les CSC favorise la minéralisation (Giraud et coll., 2019).

2.2 Les ciments tricalciques

Ces biomatériaux sont des ciments hydrauliques à base de silicate de calcium. La nature hydrophile de ces ciments en fait des matériaux appropriés en dentisterie. Ils sont dérivés de l'original ciment de Portland (figure 8). Ce ciment connaît de nombreuses utilisations dans des domaines bien divers. C'est également un ingrédient de base du béton. Il se compose entre autres de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique (Andrei et coll., 2021).

Le ciment de Portland possède différentes phases principales. Il contient principalement du silicate dicalcique et tricalcique. Il contient par ailleurs de l'aluminium tricalcique et de l'aluminoferrite tétracalcique (Andrei et coll., 2021).

En comparaison à d'autres matériaux conventionnels similaires, le ciment de Portland ne contient aucun agent radio-opacifiant. En revanche, il comporte de l'arsenic, potentiellement toxique et soulevant donc quelques inquiétudes quant à son utilisation clinique. Toutefois ce dernier n'est présent qu'en très faible quantité, par ailleurs variable selon le type de ciment de Portland utilisé. La quantité d'arsenic libérée n'est donc pas une contre-indication à l'utilisation de ce ciment (Andrei et coll., 2021).

Le ciment de Portland peut être économiquement intéressant. Il présente une composition ainsi qu'un effet antibactérien quasiment similaires au ciment MTA®. Son coût est moins élevé que celui du MTA® (Andrei et coll., 2021).

Néanmoins, le ciment de Portland à proprement parler n'est pas utilisable en tant que tel en odontologie, des processus de purification restent impératifs.

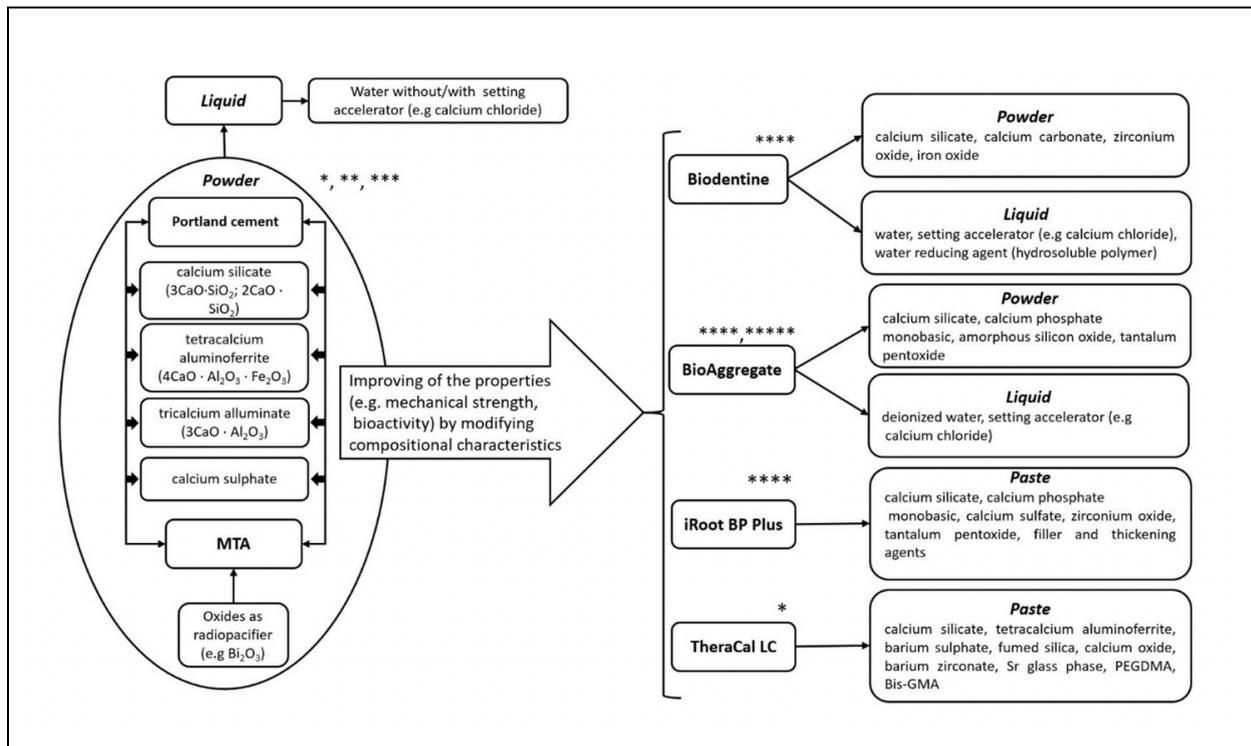


Figure 8 : composition de divers matériaux à base de silicate de calcium (source : Andrei et coll., 2021)

L'accent doit être mis sur l'aspect clinique de ces matériaux à base de silicate de calcium. En effet, le site de placement influence et détermine directement les propriétés de ces derniers (Chaudhari et coll., 2022).

2.2.1 Les ciments *Mineral Trioxide Aggregate* (MTA®)

- Présentation

Le MTA® a été introduit en 1993 par Torabinejad (Daniele, 2017) avec une première forme commerciale appelée ProRoot MTA®, de couleur grise en lien avec la présence d'oxyde de fer. Son utilisation ne donnant pas de résultat esthétique satisfaisant, sa composition a secondairement été modifiée. L'oxyde de fer a été alors remplacé par l'oxyde de magnésium, laissant place en 2002 au ProRoot MTA® blanc utilisable en secteur antérieur sans risque de dyschromie secondaire (Zafar et coll., 2020).

Lorsqu'il est en contact avec la dentine de la chambre pulpaire, le MTA® stimule la production et la libération de molécules de signalisation. Elles sont essentielles à la formation d'un nouveau tissu dans l'espace pulpaire. Le MTA® est également capable d'activer les cémentoblastes et de régénérer le ligament alvéolo-dentaire (Zafar et coll., 2020).

- Composition

Les constituants principaux du MTA® sont sous forme de poudre :

- silicate tricalcique (52-53%),
- silicate dicalcique (23%),
- aluminat tricalcique (0-4%),
- sulfate de calcium (1,5%),
- oxyde de bismuth (20%) à des fins de radio-opacité (Zafar et coll., 2020).

- Réaction et temps de prise

Le MTA® est un ciment hydrophile qui nécessite de l'humidité pour passer d'une poudre à un ciment. Il se présente sous forme d'une fine poudre hydrophile, qui mélangée à de l'eau stérile va durcir. L'hydratation de la poudre donne naissance à un gel colloïdal composé de cristaux d'oxyde de calcium dans une structure amorphe (Zafar et coll., 2020).

Le temps de prise du ProRoot MTA® gris est 2,45 heures. Celui du ProRoot MTA® blanc est de 2,20 heures (Zafar et coll., 2020). La phase de maturation du matériau est, elle, beaucoup plus lente : certains auteurs parlent même de 8 jours de maturation (Roberts et coll., 2008).

Lors du mélange, la valeur immédiate du pH est 10,2. Elle augmente à 12,5 trois heures après le mélange, valeur comparable au pH de l'hydroxyde de calcium (Zafar et coll., 2020).

Le MTA® est un matériau dynamique et actif. En effet, son application entraîne un contact constant avec les tissus dentaires et les fluides tissulaires. Après sa mise en place, il persiste pendant plusieurs années (Chaudhari et coll., 2022).

Sa prise repose sur la lixiviation de l'hydroxyde de calcium hors du MTA® hydraté qui autorise la libération d'ions calcium, mettant en évidence la bioactivité du ciment MTA® (Chaudhari et coll., 2022).

Généralement, le MTA® est placé sur un site contaminé par le sang ce qui peut influencer sur la prise du matériau et réduire la libération d'ions calcium. Ce contact avec le sang peut également altérer la couleur du MTA® et peut aussi interférer avec la radio-opacité au cours du temps (Chaudhari et coll., 2022).

Toutefois, la présence de sang permet d'assurer une humidité locale au contact du matériau participant à sa prise.

Les conditions d'application du MTA® ont un impact sur ses propriétés. En effet, si l'environnement est excessivement humide, le temps de prise ainsi que la solubilité du matériau se verront augmenter (Chaudhari et coll., 2022). Le ratio optimal pour l'obtention des propriétés mécaniques du ciment est un volume d'eau pour 3 volumes de poudre (Roberts et coll., 2008).

Tout au long de la prise du MTA®, il y a une interaction chimique avec les tissus rendant l'environnement alcalin grâce à la libération des ions calcium. Ces ions sont liés au développement de « portlandite » par le silicate dicalcique et le silicate tricalcique (Chaudhari et coll., 2022).

- Protocole clinique

Après un examen clinique et radiologique permettant de s'orienter vers la thérapeutique du coiffage direct, une anesthésie locale avec vasoconstricteur est réalisée. La mise en place d'un champ opératoire étanche est impérative. L'utilisation d'aides-optiques est conseillée tout au long de la procédure permettant de mieux réaliser le curetage de la dentine cariée et d'objectiver plus justement l'état du tissu pulpaire. En effet, le coiffage direct ne s'effectue qu'en présence d'une dentine environnante saine et d'un tissu pulpaire ne présentant aucun signe d'infection. Après avoir cureté la dentine cariée, la pulpe doit être exposée de manière précautionneuse à l'aide de fraises stériles montées sur contre-angle bague rouge sous irrigation constante. Une hémostase doit être obtenue, idéalement avec des boulettes de coton imbibées de chlorhexidine 0,2-2 % ou d'hypochlorite de sodium à 1 % (Boukpepsi et coll., 2020) suivie d'un rinçage au sérum physiologique.

- 1) Préparer le MTA®. Mélanger la poudre avec l'eau stérile. Le ratio est 1 volume d'eau pour 3 volumes de poudre
- 2) Prélever une petite quantité de MTA® à l'aide d'un instrument, tel que MTA Gun®
- 3) Appliquer une petite quantité de MTA® sur la zone pulpaire à traiter
- 4) Tamponner à l'aide d'une boulette de coton afin de retirer l'excédent d'humidité
- 5) Recouvrir le MTA® à l'aide d'un matériau de restauration coronaire temporaire étanche, tel qu'un CVIMAR

Il est important de noter ici que la prise du MTA® se faisant par absorption d'eau, l'assèchement absolu du site d'application est formellement contre-indiqué. Certains auteurs recommandent donc de placer une boulette de coton humide au contact direct du matériau de restauration temporaire étanche avant de réintervenir (Roberts et coll., 2008).

- Avantages

Il possède d'excellentes propriétés physiques. Il présente la capacité de stimuler la régénération tissulaire comme l'obtention d'une réponse pulpaire (Zafar et coll., 2020).

Le MTA® est un ciment bioactif et ostéo-conducteur. Il a la capacité de stimuler la régénération des tissus durs. Il permet aussi l'obtention d'une réponse pulpaire positive (Zafar et coll., 2020). Sa bioactivité promeut la stimulation et la régénération du complexe pulpo-dentinaire (Andrei et coll., 2021).

Le MTA® a d'excellentes propriétés telles qu'une haute compatibilité, une bonne adhésion marginale, un pH alcalin. Il engendre une lente libération de calcium et il stimule la libération de cytokines. Toutes ces qualités en font un matériau approprié pour réaliser un coiffage pulpaire direct (Bidar et coll., 2016).

Il a été démontré que l'utilisation de MTA® peut entraîner une augmentation du taux de prolifération cellulaire permettant l'induction d'un pont calcifié homogène sous le tissu pulpaire exposé (Bidar et coll., 2016).

- Inconvénients

Le MTA® est un matériau compliqué à manipuler du fait de la consistance granuleuse obtenue après mélange rendant difficile son application au niveau de l'effraction pulpaire. C'est pourquoi des systèmes applicateurs sont disponibles pour faciliter son utilisation clinique (Zafar et coll., 2020).

Une potentielle dyschromie de la dent secondairement à la mise en place du MTA® a été décrite de façon récurrente. Cette dyschromie s'explique par la réponse complexe entre la dentine et les matériaux d'obturation et à la perte de stabilité des molécules d'oxyde de bismuth. Celle-ci se produit lorsqu'elles entrent en contact étroit avec un puissant agent oxydant (Chaudhari et coll., 2021). Le collagène de la matrice

dentinaire réagit avec l'oxyde de bismuth entraînant une décoloration grisâtre (Marciano et coll., 2014).

L'oxyde de bismuth est l'agent radio-opacifiant du MTA®. Il a donc été suggéré que sa modification pourrait aider à prévenir la dyschromie de la dent. Les fabricants ont tenté de le remplacer par deux matériaux, l'oxyde de zirconium et le tungstate de calcium. Malheureusement, ils sont nécessaires en grande quantité pour atteindre le pouvoir radio-opacifiant de l'oxyde de bismuth. Les propriétés physiques et chimiques du MTA® peuvent alors en être affectées négativement (Chaudhari et coll., 2021).

Une alternative a donc été recherchée. Il s'agit d'ajouter 5% d'oxyde de zinc à la composition du MTA® permettant la conversion de l'oxyde de bismuth en bismite qui est susceptible de prévenir le changement de couleur de la dent (Chaudhari et coll., 2021).

Afin d'améliorer son utilisation clinique, la composition originelle du MTA® a été modifiée par différents fabricants. C'est ainsi qu'a été introduit, en 2001, le MTA Angelus®. Afin de diminuer son temps de prise, le sulfate de calcium a été retiré de la composition (Zafar et coll., 2020).

Un MTA® nano-blanc à prise rapide (NW-MTA®) a également été introduit. En réduisant la taille des particules, une augmentation de la surface de contact est obtenue avec le liquide, permettant une diminution du temps de prise. Celui du ProRoot MTA® blanc est de 43 minutes. Il passe alors à 6 minutes pour le NW-MTA® (Zafar et coll., 2020).

Le NW-MTA® contient des sels de strontium afin d'améliorer sa bioactivité. Il a été rapporté qu'ajouter un gel d'hypochlorite de sodium réduit de 30 à 60% le temps de prise du MTA® (Zafar et coll., 2020).

Un MTA® photo-polymérisable a également été introduit afin de contrôler le temps de prise. Afin d'initier la réaction de prise, du 2-hydroxyéthylméthacrylate (HEMA) et du tri éthylène glycol di méthacrylate (TEGDMA) ont été ajoutés au liquide (Zafar et coll., 2020).

D'autres variantes de MTA® ont été formulées afin d'améliorer les limitations des matériaux conventionnels. On peut ainsi citer par exemple le MM MTA® (Micro Mega) conditionné en capsules et présentant du carbonate de calcium dans sa composition pour accélérer sa prise et faciliter sa manipulation (Zafar et coll., 2020).

2.2.2 Le ciment Biodentine®

- Présentation

Le ciment Biodentine® est désormais un matériau appartenant à l'arsenal de routine du praticien au quotidien. Il s'agit d'un représentant de la famille des ciments à base de silicate de calcium au même titre que le MTA®, avec une formulation de synthèse destinée à pallier les déficiences du MTA® dérivé du ciment de Portland (Zafar et coll., 2020).

Développé par un laboratoire français, Septodont, Biodentine® est commercialisé depuis 2010. Le matériau se présente sous forme de capsules pré-dosées (figure 9) (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018) à mélanger préalablement avec le liquide fourni.



Figure 9 : format poudre et liquide du ciment Biodentine® (source : dentistrytoday.com)

- Constituants

On le retrouve sous forme de sachet de 0,7 g de poudre et d'une pipette de liquide à usage unique de 0,18 g.

La poudre se compose de silicate tricalcique (80,75%), de carbonate de calcium (14,25%) et d'oxyde de zirconium (5%). Ici, tous les constituants sont des composés de synthèse. Le liquide est une solution aqueuse de chlorure de calcium (14,70%) avec comme adjuvant un agent réducteur d'eau, le Fluid Premia (3%) (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018).

En comparaison avec le ciment MTA®, le ciment Biodentine® ne présente pas d'oxyde de bismuth mais de l'oxyde de zirconium. Ce dernier est une substance bio-inerte, présentant de bonnes qualités mécaniques ainsi qu'une résistance à la corrosion élevée (Chaudhari et coll., 2021).

Le silicate tricalcique, après hydratation, est responsable des propriétés mécaniques du ciment Biodentine® par la formation d'un gel rigide (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018).

Le rôle de charge est joué par le carbonate de calcium. L'oxyde de zirconium joue quant-à-lui le rôle de radio-opacifiant (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018).

Le ciment Biodentine® comprend proportionnellement plus de poudre, un agent réducteur de l'eau et entraîne moins de porosités que le MTA® impactant favorablement de nombreux facteurs tels que l'absorption et la densité (Chaudhari et coll., 2021).

- Réaction et temps de prise

La réaction d'hydratation du liquide avec la poudre entraîne la formation d'un gel poreux de silicates de calcium (CSH) et d'hydroxyde de calcium. Les espaces vides inter-grains du ciment sont remplis par du carbonate de calcium (CaCO₃). Le mélange de poudre et de liquide déclenche une réaction chimique complexe dont le schéma est le suivant :



Silicate tricalcique + eau -> gel de silicate de calcium hydraté + hydroxyde de calcium

Cette réaction chimique entraîne la formation de silicate de calcium ainsi que la libération d'hydroxyde de calcium (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018).

Le ciment Biodentine® présente un temps de prise de 12 à 13 minutes très significativement plus faible que celui du MTA®. Cette réaction à prise rapide est attribuée essentiellement à l'ajout de chlorure de calcium (CaCl₂) dans le composant liquide permettant de diminuer la teneur en liquide. La poudre de Biodentine® contient du carbonate de calcium, ce qui explique la présence d'une phase de carbone. Il possède des grains de silicate tricalcique fins, rendant sa manipulation aisée (Zafar et coll., 2020).

En seulement douze minutes, le ciment Biodentine® peut commencer à bloquer les composants sanguins. Cela lui permet de devenir de plus en plus dense et compact au fur et à mesure de sa réaction. Le résultat obtenu est une réduction de la pénétration des érythrocytes, diminuant le risque de dyschromie de la dent (Chaudhari et coll., 2021).

Un lien a été établi entre le faible temps de prise et l'absence de silicate dicalcique dans Biodentine®. En effet, celui-ci est associé à une lente réaction d'hydratation.

Une autre différence importante est l'ajout de carbonate de calcium. Il peut accélérer la réaction de prise en agissant comme site de nucléation pour le silicate de calcium hydraté (Zafar et coll., 2020).

La réaction de prise du ciment Biodentine® est toutefois similaire à celle du MTA®. Elle résulte en la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium (Zafar et coll., 2020).

Au-delà des grains de silicate tricalcique du ciment Biodentine® plus fins que ceux du MTA®, l'ajout de polymère hydrophile facilite sa manipulation (Zafar et coll., 2020).

Il faut donc environ 7 jours pour obtenir une maturation complète et une stabilité des résultats à l'instar du MTA®. Le temps de maturation du matériau se manifeste par une réduction de la porosité. Cela s'explique par la formation progressive du gel de silicates de calcium et d'hydroxyde de calcium. Ceux-ci proviennent de la dissolution des ions de la paroi des pores entre les phases solides. Les liens entre les particules de calcite augmentent grâce à la formation du gel. Ces derniers jouent donc un rôle important dans la fermeture des porosités. La réaction d'hydratation permet donc, en engendrant la formation de microstructures rigides, le développement de la résistance (Semennikova et Pradelle-Plasse, 2018).

- Protocole clinique

Après un examen clinique et radiologique permettant de s'orienter vers la thérapeutique du coiffage direct, une anesthésie locale avec vasoconstricteur est réalisée. Ensuite, il faut mettre en place un champ opératoire étanche. L'utilisation d'aides-optiques est conseillée tout au long de la procédure permettant de réaliser plus aisément le curetage de la dentine cariée et d'objectiver l'état du tissu pulpaire. En effet, le coiffage direct ne s'effectue qu'en présence d'une dentine environnante saine et d'un tissu pulpaire ne présentant aucun signe d'infection. Après avoir cureté la dentine cariée, la pulpe doit être exposée de manière précautionneuse à l'aide de fraises stériles montées sur contre-angle bague rouge sous irrigation constante. Une hémostase doit être obtenue, idéalement avec des boulettes de coton imbibées de chlorhexidine 0,2-2 % ou d'hypochlorite de sodium à 1 % (Boukpepsi et coll., 2020) suivie d'un rinçage au sérum physiologique.

Lors d'une exposition pulpaire de classe I, en dentine saine et pulpe non inflammée, cette dernière peut être nettoyée simplement à l'aide de sérum physiologique stérile. L'hémostase doit être obtenue rapidement, en moins de deux minutes. Après son obtention, le ciment Biodentine® peut être mis en place sans compression sur la plaie pulpaire (Boukpepsi et coll., 2020).

L'utilisation de Biodentine® se fait sur des surfaces dentaires qui ne nécessitent pas de traitement préalable.

- 1) Tapoter sur le bouchon de la fiole de chlorure de calcium pour éliminer les bulles d'air et obtenir des gouttes de liquide de volume équivalent, l'ouverture de la fiole se fait par mouvement de rotation
- 2) Verser 5 gouttes en maintenant la fiole parfaitement verticale sur la poudre
- 3) Agiter la capsule dans le vibreur pendant 30 secondes permettant l'obtention d'un matériau de consistance mastic brillant condensable
- 4) Appliquer le ciment Biodentine® sur la plaie pulpaire et patienter 12 minutes
- 5) Réaliser une obturation coronaire temporaire étanche

- Avantages

Le ciment Biodentine® présente des propriétés mécaniques et physico-chimiques proches de celles de la dentine, ce qui en fait un très bon substitut dentinaire. Il présente une très bonne étanchéité au niveau des interfaces entre les restaurations adhésives et les tissus minéralisés. C'est un matériau qui présente une biocompatibilité remarquable. Il est inducteur et conducteur pour la formation d'hydroxyapatite, ainsi que stimulateur de la réparation pulpaire. Biodentine® permet de multiples interactions cellulaires (Semennikova et Pradelle-plasse, 2018).

Un des avantages intéressant de ce ciment est qu'il peut être exposé en bouche. Il peut donc être utilisé en tant que matériau de restauration temporaire. On peut l'utiliser en tant que substitut amélaire jusqu'à 6 mois. Sans aucun traitement de surface, il peut être un substitut dentinaire permanent (Andrei et coll., 2021).

Les études ont mis en lumière les nombreux avantages du ciment Biodentine® par rapport aux autres ciments à base de silicate de calcium. Il présente une meilleure résistance à la compression et à la flexion. Il présente également une meilleure micro-

dureté, une résistance à l'arrachement et une libération d'ions calcium supérieures (Zafar et coll., 2020).

Biodentine® est décrit tel un matériau de réparation favorable en raison de sa biocompatibilité. Il permet un dépôt de cristaux d'hydroxyapatite à sa surface, celle-ci étant en contact direct avec les fluides tissulaires (Andrei et coll., 2021).

- Inconvénients

C'est un ciment qui présente une faible résistance à l'abrasion entraînant des défauts au niveau de la forme anatomique, de l'adaptation marginale et de la qualité du contact proximal. Sa mise en œuvre n'est pas toujours aisée, et son temps de prise de 12 minutes peut être considéré comme encore assez important. Le ciment Biodentine® est inesthétique, car il est blanc crayeux. Il présente une radio-opacité faible comparable à celle de la dentine, rendant difficile l'analyse radiologique (Semennikova et Pradelle-plasse, 2018).

Le coût de ce produit reste élevé.

2.2.3 TheraCal LC

- Présentation

Le TheraCal LC est un matériau dérivé du ciment MTA®. Il a été mis au point en 2011, aux États-Unis. Il a été développé à la suite de nombreuses études portant sur les propriétés mécaniques de l'hydroxyde de calcium (Zeater et coll., 2022).

- Réaction et temps de prise

Contrairement aux autres matériaux utilisés pour le coiffage pulpaire direct, celui-ci se distingue par sa réaction de prise. Ce matériau se photopolymérise. La réaction de prise est basée sur une photopolymérisation de 20 secondes pour chaque couche de matériau appliquée. Comme c'est un ciment hydraulique, sa prise dépend également de la quantité d'eau prélevée de l'humidité dentinaire. Celle-ci se diffuse ensuite dans le matériau. Son temps de prise est donc relativement rapide, bien qu'il soit dépendant du nombre de couches appliquées (Andrei et coll., 2021).

- Composition

Le TheraCal LC a été généré à partir d'un hydroxyde de calcium modifié par une résine photopolymérisable, et enrichi en silicate de calcium. Cela lui donne la possibilité d'être utilisé dans de nombreuses situations cliniques. On peut donc l'utiliser pour le coiffage pulpaire indirect ou direct. Mais aussi en tant que base sous une restauration à la résine composite ou à l'amalgame (Zeater et coll., 2022).

Il contient des composants minéraux, dérivés du ciment de Portland de type III. Il possède du zirconate de barium qui le rend radio-opaque. La silice fumée est un épaississant hydrophile. Enfin, il contient de la résine, ce qui explique son mode de prise par photopolymérisation. On y retrouve du méthacrylate de bis-phénylglycidyle (BisGMA) ainsi que du diméthacrylate de polyéthylène glycol (PEGDMA)(Andrei et coll., 2021).

- Avantages

En comparaison avec le MTA®, le TheraCal LC présente un court temps de prise, relativement au nombre de couches appliquées. Cela est donc un avantage à court mais également à moyen terme, car cela implique moins de séances de traitement. Il présente une maniabilité ainsi qu'une manipulation aisées, rendant agréable son utilisation clinique (Andrei et coll., 2021).

Un autre point remarquable de ce matériau est qu'il est appliqué directement, sans préparation préalable des tissus dentaires. Après l'avoir mis en place, il peut être recouvert avec différents types d'adhésifs (Andrei et coll., 2021).

Lorsqu'un matériau se photopolymérise, on peut se questionner sur la chaleur que génère ce mode de prise. En ce qui concerne le TheraCal LC, il provoque un très faible changement de température au sein de la dentine (Parirokh et coll., 2018).

- Inconvénients

La présence de résines dans sa composition est à l'origine d'une relativement faible cytocompatibilité du TheraCal LC. Celles-ci ont montré des effets toxiques sur des cultures de cellules *odontoblast-like*. En effet, il persiste une couche de monomères non polymérisés qui reste au contact du tissu pulpaire. Ces monomères, tels que les BisGMA, TEGDMA, HEMA ou encore UDMA, présentent une faible biocompatibilité (Andrei et coll., 2021).

2.3 L'hydroxyde de calcium

- Présentation

C'est Hermann qui a introduit l'hydroxyde de calcium en 1920 en odontologie. Tout d'abord, il était utilisé en tant que matériau de traitement canalair. Entre 1928 et 1930, Hermann a étudié la réaction entre le tissu pulpaire vivant et l'hydroxyde de calcium avec pour but de prouver que l'hydroxyde de calcium est un matériau biocompatible (Priti et coll., 2019).

L'hydroxyde de calcium est un matériau de coiffage pulpaire très populaire et universellement employé encore. Sa capacité à libérer des ions calciums et hydroxyles après dissolution en font ses principaux avantages. Ce biomatériau est le plus étudié et documenté dans de nombreuses études cellulaires, animales, et cliniques. Il présente des résultats satisfaisants avec 80% de réussite et est encore considéré comme le gold standard (Paula et coll., 2019).

- Réaction et temps de prise

Lorsqu'il est en contact avec le tissu pulpaire, l'hydroxyde de calcium favorise la nécrolyse superficielle entraînant des zones de nécrose et une réponse inflammatoire pulpaire. Celles-ci sont attribuées au pH de l'hydroxyde de calcium, qui s'élève à 12 environ. La formation de la zone nécrotique superficielle est suivie par la stimulation d'un processus de minéralisation directement contre cette zone nécrotique (Kim et coll., 2020). Il permet également la formation d'une barrière minéralisée avec un motif amorphe (Chicarelli et coll., 2021).

- Avantages

L'hydroxyde de calcium est un matériau bactéricide et bactériostatique favorisant la guérison et la réparation. Il possède un haut pH permettant la stimulation des fibroblastes et qui neutralise le pH faible des acides bactériens. Il permet aussi de stopper les résorptions internes. C'est un matériau qui possède d'excellentes propriétés antibactériennes ainsi qu'une faible cytotoxicité (Priti et coll., 2019).

- Inconvénients

De nombreux désavantages lui ont été trouvés : formation de dentine oblitérant la chambre pulpaire, présence de tunnels dans la barrière dentinaire, haute solubilité

dans les fluides oraux, manque d'adhésion, faiblesse mécanique et dégradation après mordantage (Priti et coll., 2019 ; Paula et coll., 2019).

2.4 L'utilisation de ciments d'obturation endodontique en tant que matériau de coiffage pulpaire ?

Récemment, les préceptes de l'obturation en endodontie ont été bousculés. Jusqu'à présent, les ciments endodontiques étaient destinés à sceller le corps de l'obturation aux parois dentinaires. Autrement dit, ces ciments répondent à l'appellation de ciment de scellement car ils sont employés pour sceller le ou les cônes de gutta-percha entre eux et aux parois canalaires. Si les préceptes de l'obturation endodontique se sont trouvés bousculés, c'est parce que de nouveaux ciments ont fait leur apparition avec non plus pour vocation de sceller les cônes de gutta-percha et les parois dentinaires mais bien d'obturer réellement le système canalaire : on parle dès lors ici de ciments d'obturation endodontique.

C'est sous la dénomination de BioRoot® RCS (Septodont), KometBioSeal® (Komet), MTA Fillapex® (Angelus), Totalfill BC Sealer® (FKG), AH Plus Bioceramic Sealer® (Dentsply), iRoot® SP (Innovative BioCeramic) ou encore EndoSequence® BC Sealer (Brasseler) qu'on peut les trouver sur le marché. On retrouve ces ciments sous une appellation générique de biocéramiques. Autrement dit, il s'agit là de céramiques bioactives qui, une fois en contact avec leur milieu, induisent une activité cellulaire. En réalité, leurs composants principaux sont des silicates de calcium (Maghoub et coll., 2019).

Bien évidemment, selon les fabricants, on va retrouver des différences de composition, mais fondamentalement les silicates de calcium restent le point commun. Ceux-ci peuvent être dérivés du ciment de Portland ou bien purement de synthèse, avec divers radio-opacifiants comme de l'oxyde de zirconium ou de l'oxyde de tantale, ils peuvent être biphasés du fait de l'introduction d'une phase de phosphate de calcium (Chaudhari et coll., 2021). Ils sont parfois liés à une matrice résineuse. Ils se présentent sous forme d'une poudre et d'un liquide à mélanger ou d'une seringue auto-mélangeuse : quoi qu'il en soit, les matériaux d'obturation endodontique restent des silicates de calcium. De ce fait, certains auteurs (Song et coll., 2021 ; Motwani et coll., 2021) ont décrit leur utilisation aussi comme matériau de coiffage direct. Le ciment BioAggregate® (VerioDental) a ainsi

été décrit comme ayant une capacité à faire migrer des cellules pulpaire humaines supérieure à celle d'un ciment MTA dérivé du ciment de Portland. Andrei et coll en 2021 montrent que le ciment BioAggregate® active la voie MAPK des cellules pulpaire favorisant la différenciation et la minéralisation des odontoblastes. Kim et coll. en 2016 ont comparé les ciments Biodentine® et BioAggregate® placés en coiffage direct sur des pulpes de rats et ont montré dans les deux situations l'obtention d'un pont dentinaire parfaitement calcifié. Patrick et coll. en 2021 ont comparé le taux de succès de coiffages pulpaire mis en œuvre avec Biodentine® et EndoSequence® : aucune différence réellement significative n'a pu être mise en évidence à 12 mois.

Somme toute, à l'observation de ces différents produits mis à la disposition des praticiens, il apparaît essentiellement que leur dénomination jette un trouble sur ce qu'ils sont assurément : des ciments silicates de calcium. À ce titre, même s'ils sont conditionnés pour être employés en endodontie, on comprend qu'ils puissent l'être en tant que matériaux de coiffage pulpaire direct. Bien évidemment, les différences entre les différents matériaux en lien avec les proportions des divers constituants, la présence ou l'absence de certains composants, sont de nature à interférer avec leurs propriétés potentielles. Il n'en reste pas moins vrai que si l'appellation de ciments biocéramiques est avantageuse du point de vue commercial, elle est aussi trompeuse du point de vue scientifique.

3. Suivi clinique et radiologique d'une dent traitée par coiffage

3.1 Succès thérapeutique

3.1.1 Définition

Le succès du coiffage direct repose sur le maintien de la vitalité et des fonctions pulpaire. Il dépend également de la formation d'un pont dentinaire. Le pronostic de succès de la thérapeutique repose sur divers facteurs. On peut citer la taille et la profondeur de l'exposition pulpaire. La présence de micro-organismes au niveau du site d'exposition est également un critère fondamental. Enfin, l'âge du patient et le type de biomatériau utilisé sont aussi extrêmement importants par leur influence sur le résultat thérapeutique (Andrei et coll., 2021).

L'obtention d'un pont dentinaire est un marqueur important du succès de cette thérapeutique. En effet, la présence de dentine réparatrice est une barrière contre la pénétration des stimuli extérieurs. Mais ce pont dentinaire doit répondre à différents critères. Il peut être présent en grande ou faible quantité. Il présente une homogénéité variable. Enfin, la présence ou l'absence de tubules au sein de la dentine réparatrice sont des facteurs importants de réussite (Bidar et coll., 2016).

3.1.2 Suivi clinique

Le suivi est indispensable d'une part afin de vérifier la suppression des signes cliniques initiaux, la non-apparition de nouveaux signes cliniques et la formation d'un pont dentinaire minéralisé et d'autre part afin d'intercepter les complications pulpaire, telles que le développement d'une lésion inflammatoire péri-radulaire d'origine endodontique. Cette dernière est souvent d'apparition discrète et non douloureuse (Boukpepsi., 2019).

L'examen de contrôle repose sur différents tests. Il comprend le test de palpation, le test de sensibilité pulpaire, le test électrique. Il comprend également le test de percussion moins discriminant qui ne fait que signaler une inflammation du ligament alvéolo-dentaire.

Cet examen de contrôle suit un ordre chronologique précis. Il doit avoir lieu à trois semaines, quatre semaines, trois mois, six mois et douze mois. Puis, lors des cinq années consécutives au coiffage direct, un contrôle une fois par an est requis (Boukpepsi et coll., 2019).

L'instauration de ce suivi permet d'objectiver la disparition des signes cliniques ainsi que la non-apparition de lésion péri-radicaire (Boukpepsi et coll., 2020).

3.1.3 Suivi radiologique

En parallèle au suivi clinique, un suivi en imagerie de la dent coiffée doit être assuré. Deux points essentiels sont à observer : la non-apparition de lésions péri-radicaire en premier lieu et, en second lieu, la formation d'un pont dentinaire (Boukpepsi et coll., 2019). L'examen de première intention à ce titre est le cliché intra-buccal rétro-alvéolaire (figure 10). Pour plus de précision, le recours à de l'imagerie 3D avec la tomographie volumique à faisceaux coniques ou *Cone Beam Computed Tomography* (CBCT) peut être très intéressant. L'observation en trois dimensions va en effet permettre une visualisation précoce de toute apparition, qu'il s'agisse du pont dentinaire ou d'une lésion péri-radicaire (Bui et Pham, 2021). Toutefois, en raison de l'irradiation générée par le CBCT, son recours doit être raisonné.



Figure 10 : succès à deux ans d'un coiffage pulpaire direct, absence de radio clarté péri-apicale (source : Llana et coll., 2020)

3.2 L'échec thérapeutique

3.2.1 Suivi clinique et radiologique

L'échec thérapeutique d'une dent coiffée directement peut se signer de deux façons différentes. La première est une inflammation irréversible de la pulpe qui se déclenche et qui va être source de douleurs intenses apparaissant le plus souvent à la 48^e heure après le coiffage. La seconde éventualité clinique de l'échec est une nécrose du tissu pulpaire se faisant le plus souvent à bas bruit et pouvant être objectivée par l'apparition de radio-clartés péri-radiculaires (figure 11). Cette deuxième éventualité, plus chronique, apparaît dans un temps par rapport au coiffage de plusieurs semaines voire de plusieurs mois (Clot et coll., 2013).

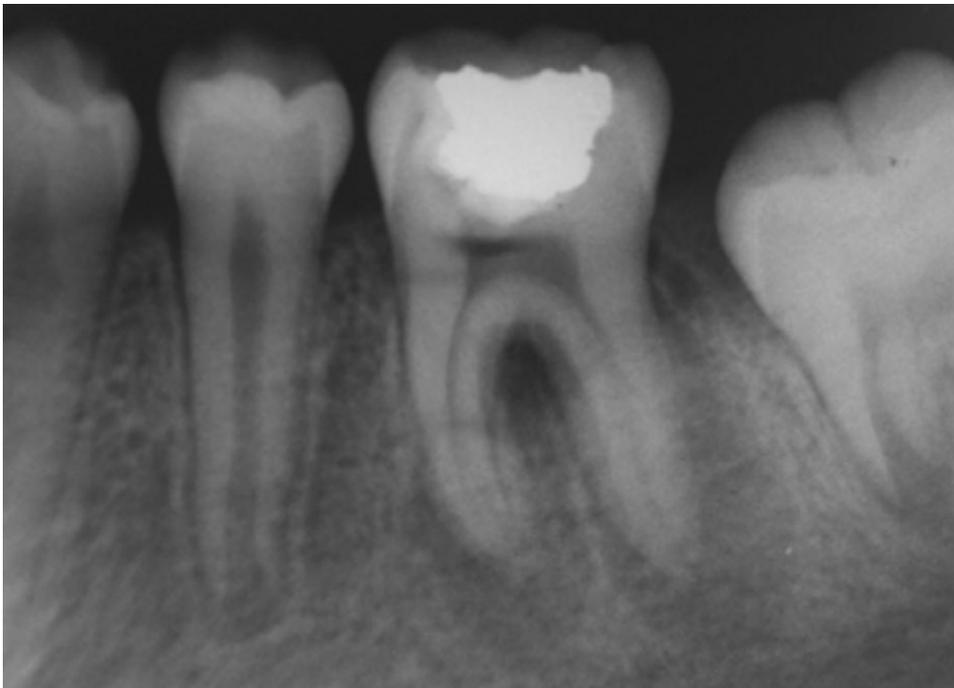


Figure 11 : échec à 12 mois d'un coiffage pulpaire direct. Apparition de lésions péri-apicales en regard des apex mésiaux et distaux (source : Llana et coll., 2020)

3.2.2 Quelle thérapeutique en cas d'échec ?

Les solutions thérapeutiques offertes au praticien en cas d'échec dépendent de la nature dudit échec. Face à une nécrose du tissu pulpaire et à l'éventuelle apparition de lésions radio-claires péri-radiculaires, seul un traitement endodontique sera à même d'assurer la préservation de la dent sur l'arcade. La qualité de la préparation physique du système canalaire associée à une irrigation abondante et fréquemment renouvelée avec une action solvante des débris minéraux comme des débris

organiques sont les garantes d'une suppression efficace des micro-organismes ayant colonisé le tissu pulpaire. Cette désinfection se devra alors d'être pérennisée par une obturation endodontique tridimensionnelle et étanche associée à une obturation coronaire de qualité.

La situation est possiblement différente face à une pulpe coiffée directement qui s'enflamme de façon aiguë et irréversible. Très classiquement face à une pulpite irréversible, le choix d'un traitement endodontique est fait. Pourtant, ce choix n'est pas sans conséquence en termes de maintien de l'organe dentaire sur l'arcade tant on sait qu'une dent dépulpée est mécaniquement moins résistante. Partant de ce constat établi, d'autres thérapeutiques existent, s'inspirant de ce qui a été initialement réfléchi comme thérapeutique des dents immatures pour assurer la continuation de l'édification radulaire et l'apexogénèse.

Ainsi, devant une dent présentant une pulpite irréversible, à des fins d'économie tissulaire et de préservation de ses qualités mécaniques, des thérapeutiques moins invasives peuvent être mises en place : pulpotomies partielle ou complète sont ainsi actuellement à considérer avant de se diriger systématiquement vers le traitement endodontique complet.

- Pulpotomie partielle

Les conditions cliniques indispensables à la pulpotomie partielle sont identiques à celles du coiffage pulpaire direct. Il faut tout d'abord réaliser une anesthésie locale et mettre en place un champ opératoire étanche. Ensuite, une désinfection de la plaie pulpaire est indispensable. Une amputation du tissu pulpaire inflammatoire sur 2 mm se fait à l'aide d'une fraise boule diamantée stérile montée sur un contre-angle bague rouge, toujours sous irrigation abondante (Clot et coll., 2013).

Le nettoyage de la plaie pulpaire s'effectue avec du sérum physiologique. Dans cette thérapeutique, on ne cherche surtout pas à obtenir un caillot sanguin mais bien simplement une hémostase. Après obtention de l'hémostase, un coiffage sans compression du tissu pulpaire est réalisé. La pulpotomie partielle se distingue du coiffage pulpaire direct car ici le matériau est maintenu sur une hauteur de 2 mm dans l'espace pulpaire (figure 12). On dispose alors d'un volume et d'une surface suffisants pour la mise en place d'un matériau de restauration temporaire ou d'usage dans les meilleures conditions (Clot et coll., 2013).



Figure 12 : schéma de pulpotomie partielle (source : Bérès et coll., 2022)

- Pulpotomie complète

Cette thérapeutique est globalement similaire à celle de la pulpotomie partielle. Sa spécificité réside en la nécessité de l'élimination totale de la masse pulpaire camérale. Elle doit être éliminée jusqu'aux orifices canaux, ou en deçà de 2 à 3 mm. Cela est nécessaire afin d'aboutir à une hémostase. Après son obtention, le tissu radulaire est coiffé à l'aide d'un biomatériau (figure 13) (Clot et coll., 2013). Le recours à la pulpotomie complète se fait lorsque la pulpe camérale est entièrement inflammatoire de façon irréversible et que l'hémostase n'est pas obtenue à l'issue de l'amputation partielle. De la même façon, la non-obtention de l'hémostase aux entrées canaux dans un délai raisonnable à l'issue de la pulpotomie complète justifie alors le recours au traitement endodontique complet.

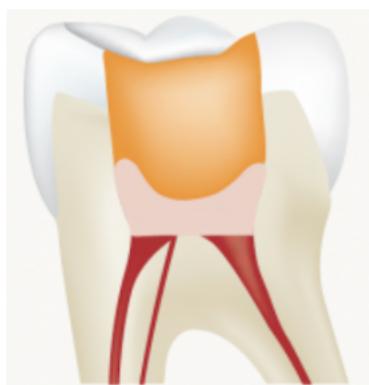


Figure 13 : schéma de pulpotomie complète (source : Bérès et coll., 2022)

4. Les particularités du coiffage pulpaire direct sur dents permanentes immatures

4.1 Définition

Une dent permanente immature se définit par une édification radiculaire incomplète ainsi qu'un foramen apical largement ouvert.

Sans vitalité du tissu pulpaire, l'édification radiculaire ne peut s'achever. Dans ce cas, la dent stoppe son éruption. Les racines dont la croissance n'est pas terminée sont fines et inaptes à supporter les forces de mastication pouvant conduire potentiellement à une fracture de la dent (Vu et coll., 2020).

4.2 Indications

La gestion des lésions carieuses profondes des dents permanentes immatures représente le meilleur challenge en termes de maintien de la vitalité pulpaire. En effet, leur particularité étant un développement radiculaire incomplet, la prise en charge clinique est de fait très intéressante.

La pulpe d'une dent immature peut être exposée via une lésion carieuse, un traumatisme dentaire ou une excavation mécanique. Le choix se fait entre les thérapeutiques conservatrices ou non conservatrices. Il faut alors décider entre le maintien de la vitalité pulpaire ou sa suppression par le biais d'un traitement endodontique associé à une procédure d'apexification (Vu et coll., 2020).

Traditionnellement, l'éviction non sélective de divers tissus est préconisée pour la prise en charge des lésions carieuses profondes. Dans cette optique, la dentine déminéralisée est complètement éliminée afin d'obtenir des tissus durs de dentine translucide ou hyper minéralisée (Jinn Tong et coll., 2022).

D'une part, la nature destructrice des méthodes conventionnelles entraîne un risque d'exposition pulpaire accidentelle. D'autre part, des études ont montré que 25 à 50 % des bactéries sont présentes dans les parois cavitaires malgré l'élimination complète du tissu carieux (Jinn Tong et coll., 2022).

Les points de vue contemporains et les recherches actuelles s'accordent sur le fait qu'une lésion carieuse ne peut pas être traitée par l'élimination complète des bactéries existantes. Une lésion carieuse doit plutôt être vue comme une maladie pouvant être

contrôlée par une gestion judicieuse, tant quantitative que qualitative, du biofilm bactérien (Jinn Tong et coll., 2022).

Selon les directives de l'*American Academy of Pediatric Dentistry* (AAPD), certaines lésions carieuses et certains traumatismes dentaires doivent être traités par une thérapeutique de maintien de la vitalité pulpaire. Pour se faire, le diagnostic doit être soit une pulpe saine, soit une pulpe atteinte de façon réversible. Une pulpe saine est considérée sans symptôme et présentant une réponse normale aux tests de vitalité pulpaire. Une pulpite réversible se traduit par une pulpe vitale capable de cicatriser (Vu et coll., 2020).

4.3 Objectif du coiffage pour les dents permanentes immatures : l'apexogénèse

L'objectif premier des thérapeutiques des lésions pulpaires d'une dent permanente immature est la préservation de la vitalité pulpaire de façon à ce qu'elle puisse continuer à assurer ses fonctions et permettre à l'édification radiculaire de se prolonger jusqu'à la fermeture apicale, autrement appelée apexogénèse (Vu et coll., 2020).

En l'absence de vitalité pulpaire, l'édification radiculaire est stoppée et la fermeture apicale doit être générée sans continuation de la croissance des racines par le biais d'un bouchon artificiel mis en place par le praticien. Cette procédure prend ici le nom d'apexification qui est donc bien à distinguer de l'apexogénèse.

On retrouve parmi les thérapeutiques de maintien de la vitalité pulpaire des dents permanentes immatures les mêmes techniques que celles dédiées aux dents matures : le coiffage direct, la pulpotomie partielle ou la pulpotomie complète. L'idée conductrice est de préserver le tissu pulpaire qui certes a été compromis mais pas détruit. L'aide au choix du traitement se fait donc ici à nouveau selon le degré de l'inflammation pulpaire et le contrôle de l'hémorragie (Ouni et coll., 2022).

La thérapeutique de coiffage, elle, fait appel aux mêmes matériaux qu'en denture mature afin d'aboutir à la formation d'un pont dentinaire qui va sceller le tissu pulpaire exposé (Ouni et coll., 2022). Les ciments silicates de calcium et l'hydroxyde de calcium trouvent donc bien ici leur place avec leurs caractéristiques, avantages et inconvénients, déjà décrits dans ce travail.

4.4 Suivi clinique et radiologique d'une dent permanente immature traitée par coiffage

Cette partie s'appuie sur deux cas cliniques traités par van der Vyver et coll. en 2018. Leur travail s'est porté sur deux jeunes patients, dans un contexte de lésions carieuses profondes sur dents permanentes immatures. Dans les deux cas, le coiffage pulpaire a été réalisé en une unique séance avec comme biomatériau de coiffage un MTA. Pour ces deux patients, un examen clinique et radiographique a été réalisé. Un test de sensibilité pulpaire a conduit au diagnostic de pulpite réversible. Les lésions carieuses ont été mises en évidence à l'aide d'un colorant, puis ont été éliminées à l'aide d'une fraise boule montée sur contre-angle bague verte. La pulpe exposée a ensuite été désinfectée à l'aide d'hypochlorite de sodium.

- Cas clinique 1 (Van der Vyver et coll., 2018)

Le patient est âgé de 8 ans. Il présente un matériau de restauration provisoire mis en place par un autre praticien ayant réalisé le curetage de la lésion carieuse sur la dent numéro 44 (figure 14). Le suivi clinique et radiologique s'est établi comme tel après le coiffage : 10 jours, 3 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans et 4 ans. Le traitement a été un succès, en effet le développement radiculaire s'est poursuivi et a abouti à une fermeture apicale (figure 15). Le ligament alvéolo-dentaire s'est développé intégralement. La dent répond positivement au test de sensibilité pulpaire et est totalement asymptomatique.

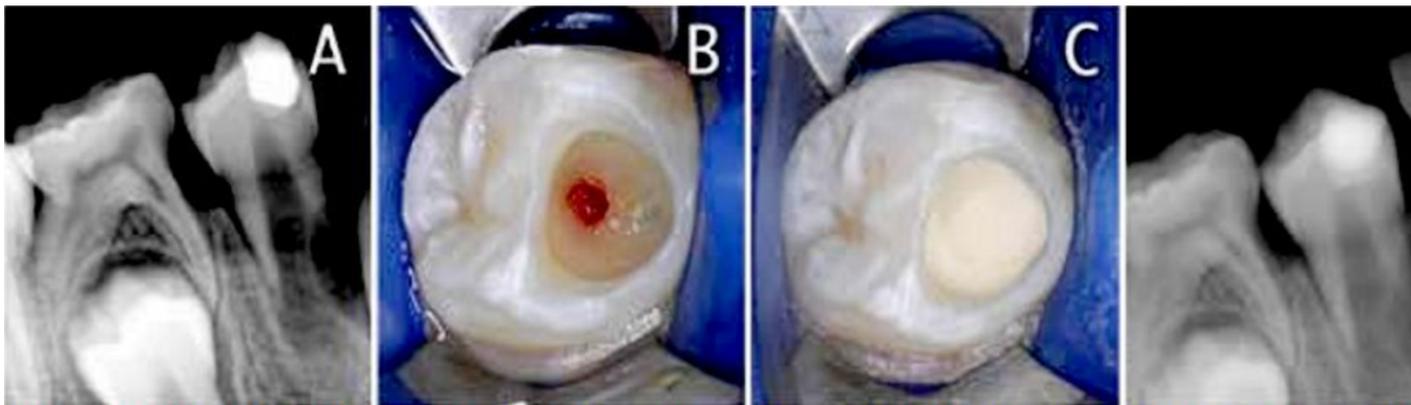


Figure 14 : coiffage pulpaire direct au MTA (A) radiographie rétro-alvéolaire pré-opératoire objectivant un matériau de restauration provisoire (B) exposition pulpaire à la suite de la dépose de la restauration (C) coiffage pulpaire direct au MTA (D) radiographie rétro-alvéolaire après restauration d'usage (source : van der Vyver et coll., 2018)



Figure 15 : suivi radiologique (A) à un an, on observe une croissance radiculaire et un fin pont dentinaire (B) à deux ans (C) à trois ans objectivant la formation radiculaire complète ainsi que la fermeture apicale et (D) à quatre ans (source : Van der Vyver et coll., 2018)

- Cas clinique 2 (Van der Vyver et coll., 2018)

Le patient est âgé de 7 ans. Il présente une lésion carieuse profonde sur la dent numéro 36. Celle-ci présente des apex largement ouverts. À la suite du coiffage pulpaire direct, le suivi a été instauré à 15 jours, 3 mois, 1 an, 2 ans, 4 ans et 6 ans (figure 16). Le traitement a été un succès. La dent répond favorablement au test de sensibilité pulpaire, la croissance radiculaire a abouti à la fermeture des apex. La dent est totalement asymptotique 14 ans après la thérapeutique.

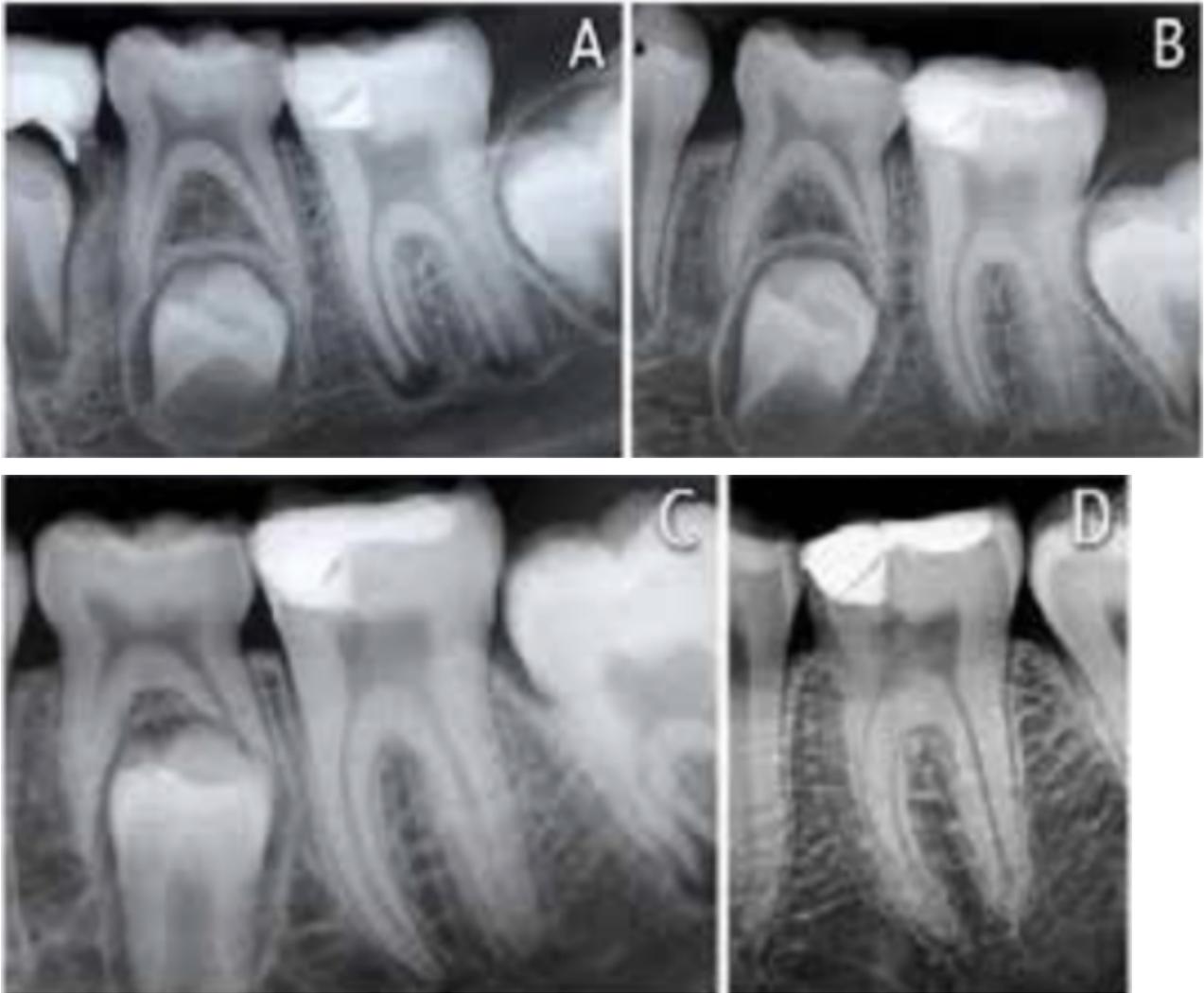


Figure 16 : suivi radiologique d'un coiffage pulpaire direct au MTA (A) radiographie rétro-alvéolaire post-opératoire immédiate, (B) à 2 ans, (C) à 4 ans (D) à 14 ans (source : van der Vyver et coll., 2018)

5. Les contre-indications au coiffage direct des dents permanentes

5.1 Contre-indications générales

Les contre-indications générales au coiffage pulpaire direct tiennent compte de l'état de santé général du patient. Il faut distinguer trois catégories de patients : la population générale, les patients immunodéprimés et les patients à haut risque d'endocardite infectieuse. Concernant la population générale, aucun acte n'est contre-indiqué. Pour les patients immunodéprimés, le coiffage pulpaire direct n'est pas contre-indiqué. Cependant, ces patients sont à risque accru d'infection. Il est alors primordial de tenir compte du type de pathologie et d'instaurer la mise en place d'un suivi régulier afin d'éviter l'apparition de lésion carieuse ou de foyer infectieux.

Pour les patients à haut risque d'endocardite infectieuse, les soins endodontiques sont exceptionnels. Ils doivent être réalisés uniquement sur dent vivante, avec la mise en place d'un champ opératoire et en une seule séance. Le coiffage direct sur une dent vitale ne peut donc ici pas apparaître comme formellement contre-indiqué. Toutefois, une évaluation extrêmement précise des chances de succès du coiffage selon les conditions d'exposition de la pulpe tout comme une surveillance particulièrement stricte du maintien de la vitalité pulpaire sont à instaurer.

Une bonne hygiène orale et la motivation du patient sont d'autres critères fondamentaux. Le suivi d'une dent coiffée, comme évoqué plus haut, requiert une observance du patient qui doit revenir régulièrement et au long cours au cabinet dentaire.

5.2 Contre-indications locales

Il existe différents critères d'exclusion d'une thérapeutique conservatrice. On y trouve en premier lieu l'impossibilité de poser un champ opératoire étanche. La nécessité d'un ancrage radiculaire, la difficulté à obtenir une hémostase ou la présence d'une nécrose pulpaire en font également partie (Boukpepsi et coll., 2020).

Une dent présentant un historique de :

- douleurs spontanées et/ou nocturnes,
- mobilité dentaire excessive,
- épaissement du ligament alvéolo-dentaire,
- signes radiologiques d'une atteinte de furcation ou d'image péri-apicale,
- hémorragie pulpaire incontrôlable,
- exsudat purulent et/ou séreux lors de l'exposition pulpaire,

ne peut répondre à un traitement par coiffage pulpaire direct (Maiti et coll., 2020).

6. Le laser : une thérapeutique alternative ?

L'utilisation du laser pour le coiffage pulpaire direct semble présenter un avenir prometteur. Il respecte les sciences cliniques et fondamentales du fait de son adaptabilité et de son large champ d'application (Alsofi et coll., 2022).

La thérapie laser de bas niveau a largement été utilisée en médecine et en dentisterie. Le laser a des effets anti-inflammatoires, analgésiques et biostimulants. Il a de grands avantages quant à l'accélération du processus de cicatrisation. Ces excellentes propriétés suggèrent que le laser de bas niveau pourrait jouer un rôle essentiel dans le succès du coiffage pulpaire direct. Il favorise la formation de tissus durs et accélère le processus inflammatoire des tissus pulpaire endommagés (Bidar et coll., 2016). L'utilisation du laser pour la coagulation du tissu pulpaire exposé permet de créer une base biologique pour la formation de dentine réparatrice (Yamakawa et coll., 2018).

Les lasers présentent d'excellents résultats en termes de décontamination et d'hémostase. C'est pour cela qu'ils ont vu leur popularité augmenter dans les mises en œuvre de coiffage pulpaire direct (Komabayashi et coll., 2015).

La photo biostimulation, l'utilisation de la thérapie laser diode de bas niveau *diode low-level laser therapy* (LLLT) présente l'avantage d'accélérer la guérison du tissu pulpaire exposé en combinaison avec un matériau de coiffage via la prolifération progressive de fibroblastes et la formation de dentine tubulaire. Il a été démontré que l'utilisation combinée du laser au matériau bioactif majore les résultats du coiffage pulpaire direct (Alsofi et coll., 2022).

En fonction de la situation, l'utilisation d'un laser Er:YAG ou Er,Cr :YSGG peut s'ajouter à l'éviction dentinaire mécanique. En effet, le laser est capable d'éliminer la dentine cariée sans contact direct avec celle-ci. L'utilisation du laser permet donc de minimiser les dommages possibles sur le tissu pulpaire exposé (Komabayashi et coll., 2015).

L'utilisation du laser Er:YAG avec de l'eau stérile permet l'élimination des débris en surface et la stérilisation du tissu. Lorsqu'il est utilisé sans eau, il permet d'obtenir une hémostase par la formation d'une couche de coagulation. Sur cette dernière viendra se former un pont dentinaire à la suite de l'application d'un matériau bioactif (Cochet et Gabriel, 2019).

L'utilisation du laser, sans contact avec la zone pulpaire hémorragique, permet d'obtenir l'hémostase, la décontamination et la stérilisation de la zone pulpaire exposée ainsi que de la dentine adjacente (Komabayashi et coll., 2015).

Actuellement, le laser représente donc un outil complémentaire dans la thérapeutique de coiffage pulpaire direct. Des études récentes ont rapporté un taux de succès de 90% lors de la combinaison de l'utilisation du laser lors du coiffage pulpaire direct (Kermanshah et coll., 2020 ; Komabayashi et coll., 2015). Ce succès est vraisemblablement en lien avec les capacités de désinfection et de coagulation des lasers, de ses effets antibactériens mais aussi de l'obtention d'un environnement stérile puisque chaque type de laser a un effet stérilisant. Ce dernier point est essentiel car, un des facteurs décisifs de la réussite du coiffage pulpaire direct repose sur l'absence de bactérie (Kermanshah et coll., 2020).

Des études ont été menées sur les effets du laser Er:YAG sur la pulpe dentaire (Komabayashi, 2015 ; Kermanshah et coll., 2020 ; Yamakawa et coll., 2018). Celles-ci ont montré qu'il était capable de déclencher une réponse réparatrice de la pulpe, la formation d'un pont dentinaire mais aussi la prévention de la formation de caries secondaires.

L'utilisation d'un laser Er:YAG en vue d'une procédure de coiffage direct requiert une anesthésie locale avec vasoconstricteur puis la pose d'un champ opératoire parfaitement étanche. La cavité dans le tissu amélaire est réalisée à l'aide d'un contre-angle à bague rouge sous spray muni d'une fraise cylindrique diamantée, tandis que l'éviction de la dentine cariée est menée avec un contre-angle réducteur à bague verte monté d'une fraise boule de gros diamètre.

L'agrandissement de la zone d'effraction pulpaire doit se faire à l'aide de fraises en carbure de tungstène stériles de plus petit diamètre. À ce stade, le laser est employé, sous spray, durant 20 secondes à 20 Hz pour obtenir une désinfection de la plaie pulpaire. Une utilisation du laser sans spray durant 3 secondes permet l'obtention de la coagulation. Alors la plaie pulpaire peut être coiffée à l'aide du matériau bioactif qui sera secondairement recouvert du matériau de restauration coronaire (Cochet et Gabriel, 2019).

Toutefois, à ce jour, la certitude d'un bénéfice de l'utilisation combinée du laser et d'un matériau de coiffage n'est pas acquise. Ainsi, Kermanshah et coll. en 2020 n'obtiennent pas de différences significatives en termes de maintien de la vitalité après une thérapeutique de coiffage seule au MTA ou bien après une thérapeutique de coiffage au MTA associée à l'utilisation du laser Er:YAG dans une étude clinique portant sur 26 dents. Cette étude rejoint en cela les résultats obtenus par Hashemina et coll. en 2010 sur un modèle animal, en l'occurrence des canines de chats.

Ainsi, si l'on comprend et si l'on admet en théorie l'intérêt potentiel de l'utilisation des lasers en association avec les techniques plus conventionnelles de coiffage pulpaire, la preuve scientifique reste à démontrer plus clairement.

Conclusion

La conservation de la vitalité pulpaire est un défi du quotidien pour le chirurgien-dentiste. Les nombreuses fonctions de la pulpe la rendent particulièrement précieuse pour l'organe dentaire : proprioception, nutrition et défense de la dent sont en grande partie assurées par ce paquet conjonctif vasculo-nerveux situé en son cœur. Essentielle à la dent permanente mature, elle l'est plus encore à la dent permanente immature pour autoriser la croissance radiculaire jusqu'à son terme signé par la fermeture apicale.

Le coiffage pulpaire direct est une thérapeutique pleinement en accord avec les préceptes actuels d'économie et de préservation tissulaire de la dent. Bien évidemment, le coiffage pulpaire direct n'est pas une technique menant systématiquement au succès. Les conditions opératoires, le passé de la dent, la maîtrise du praticien sont autant de paramètres susceptibles de modifier le pronostic du coiffage en termes de maintien de la vitalité pulpaire.

Au même titre de volonté de préservation de cette vitalité, pulpotomie partielle ou pulpotomie complète apparaissent comme des techniques certes plus invasives mais néanmoins proches du coiffage direct dans leurs fondements et comme les derniers remparts avant un traitement endodontique complet.

Une bonne connaissance des matériaux s'impose également au praticien afin que leur usage soit optimisé. Dans ce cadre, les lasers semblent pouvoir jouer un rôle intéressant. Si une évolution à venir dans les biomatériaux à disposition des praticiens est possible, nul doute qu'à plus long terme les thérapeutiques fondées sur l'utilisation des cellules souches et la régénération tissulaire sauront également se mettre au service du maintien de la vitalité pulpaire et majorer le succès de nos thérapeutiques.

Bibliographie

1. Al-Saudi K, Nabih S, Farghaly A, AboHage E. Pulpal repair after direct pulp capping with new bioceramic materials: A comparative histological study. *Saudi Dent J.* 2019; 31(4): 469-475.
2. Alsofi L, Khalil W, Binmadi N, Al-Habib M, Alharbi H. Pulpal and periapical tissue response after direct pulp capping with endosequence root repair material and low-level laser application. *BMC Oral Health.* 2022; 22: 57.
3. Andrei M, Vacaru R, Coricovac A, Ilinca R, Didilescu A, Demetrescu I. The Effect of Calcium-Silicate Cements on Reparative Dentinogenesis Following Direct Pulp Capping on Animal Models. *Molecules.* 2021; 26(9): 2725.
4. Bhat S, Hegde S, Adhikari F, Bhat V. Direct pulp capping in an immature incisor using a new bioactive material. *Contemp Clin Dent.* 2014; 5(3): 393-396.
5. Bidar M, Moushekhian S, Gharechahi M, Talati A, Ahrari F, Bojarpour M. The Effect of Low Level Laser Therapy on Direct Pulp Capping in Dogs. *J Lasers Med Sci.* 2016; 7(3): 177-183.
6. Boukpepsi T, Drossart M, Bérès F. Coiffage pulpaire direct, pulpotomie, pulpectomie : où en sommes-nous en 2020 ? *Réal Clin.* 2019 ; (4) : 241-252.
7. Bui A, Pham K. Evaluation of Reparative Dentine Bridge Formation after Direct Pulp Capping with Biodentine. *J Int Soc Prev Community Dent.* 2021; 11(1): 77-82.
8. Chaudhari P, Chandak M, Jaiswal A, Mankar N, Paul P. A Breakthrough in the Era of Calcium Silicate-Based Cements: A Critical Review. *Cureus.* 2022; 14(8): e28562.
9. Chicarell L, Webber M, Amorim J, Rangel A, Camilotti V, Sinhoreti M, et coll. Effect of Tricalcium Silicate on Direct Pulp Capping: Experimental Study in Rats. *Eur J Dent.* 2021; 15(1): 101-108.
10. Clot D, Lasfargues J, Boukpepsi T. Gérer l'exposition pulpaire sur une dent permanente. *Réal Clin.* 2013 ; (4) : 265-276.
11. Cochet J, Gabriel R. Le laser Er:YAG en endodontie. *Réal Clin.* 2019 ; (1) : 21-30.
12. Daniele L. Mineral Trioxide Aggregate (MTA) direct pulp capping: 10 years clinical results. *G Ital di Endo.* 2017; 31: 48-57.

13. Giraud T, Jeanneau C, Rombouts C, Bakhtiar H, Laurent P, About I. Pulp capping materials modulate the balance between inflammation and regeneration. *Dental Mater.* 2019; 35(1): 24-35.
14. Hashemina S, Feizi G, Razavi S, Feizianfard M, Gutknecht N, Mir M. A comparative study of three treatment methods of direct pulp capping in canine teeth of cats: a histologic evaluation. *Lasers Med Sci.* 2010; 25(1): 9-15.
15. Iaculli F, Rodríguez-Lozano F, Briseño-Marroquín B, Wolf T, Spagnuolo G, Rengo S. Vital Pulp Therapy of Permanent Teeth with Reversible or Irreversible Pulpitis: An Overview of the Literature. *J Clin MED.* 2022; 11(14): 4016.
16. Kermanshah H, Ranjbar Omrani L, Ghabraei S, Fekrazad R, Daneshparvar N, Bagheri P. Direct Pulp Capping With ProRoot MTA Alone and in Combination With Er:YAG Laser Irradiation: A Clinical Trial. *J Lasers Med Sci.* 2020; 11(1): S60-S66.
17. Kim J, Song Y, Min K, Kim S, Koh J. Evaluation of reparative dentin formation of ProRoot MTA, Biodentine and BioAggregate using micro-CT and immunohistochemistry. *Restor Dent Endod.* 2016; 41(1): 29-36.
18. Kim Y, Lee D, Kim H, Kye M, Kim S. Biological Characteristics and Odontogenic Differentiation Effects of Calcium Silicate-Based Pulp Capping Materials. *Materials (Basel).* 2021; 14(16): 4661.
19. Komabayashi T, Ebihara A, Aoki A. The use of lasers for direct pulp capping. *J Oral Sci.* 2015; 57(4): 277-286.
20. Komabayashi T, Zhu Q, Eberhart R, Imai Y. Current status of direct pulp-capping materials for permanent teeth. *Dent Mater J.* 2016; 35(1): 1-12.
21. Lesclous P. Prescription des antibiotiques en pratique bucco-dentaire: Recommandations Afssaps 2011. *Med Buccale Chir Buccale.* 2011 ; 17(4) : 334-346.
22. Llana C, Hernández M, Melo M, Sanz J, Forner L. Follow-up of patients subjected to direct and indirect pulp capping of young permanent teeth. A retrospective study. *Clin Exp Dent Res.* 2020; 7(4): 429-435.
23. Mahgoub N, Alqadasi B, Aldhorae K, Assiry A, Altawili Z, Tao Hong. Comparison between iRoot BP Plus (EndoSequence Root Repair Material) and Mineral Trioxide Aggregate as Pulp-capping Agents: A Systematic Review. *J Int Soc Prev Community Dent.* 2019; 9(6): 542-552.

24. Manaspon C, Jongwannasiri C, Chumprasert S, Sa-Ard-lam N, Mahanonda R, Pavasant P, et coll. Human dental pulp stem cell responses to different dental pulp capping materials. *BMC Oral Health*. 2021; 21: 209.
25. Marciano M, Costa R, Camilleri J, Mondelli R, Guimarães B, Duarte M. Assessment of Color Stability of White Mineral Trioxide Aggregate Angelus and Bismuth Oxide in Contact with Tooth Structure. *J Endod*. 2014; 40(8): 1235-1240.
26. Marciano M, Duarte M, Camilleri J. Dental discoloration caused by bismuth oxide in MTA in the presence of sodium hypochlorite. *Clin Oral Investig*. 2015; 19(9): 2201-2209.
27. Matsuura T, K. S. Kawata-Matsuura V, Yamada S. Long-term clinical and radiographic evaluation of the effectiveness of direct pulp-capping materials. *J Oral Sci*. 2019; 61(1): 1-12.
28. Maturo P, Costacurta M, Bartolino M, Docimo R. MTA applications in pediatric dentistry. *Oral Implantol (Rome)*. 2010; 2(3): 37-44.
29. Morotomi T, Washio A, Kitamura C. Current and future options for dental pulp therapy. *Jpn Dent Sci Rev*. 2019; 55: 5-11.
30. Motwani N, Ikhari A, Nikhade P, Chandak M, Rathi S, Dugar M, et coll. Premixed bioceramics: A novel pulp capping agent. *J Conserv Dent*. 2021; 24(2): 124-129.
31. Nie E, Yu J, Jiang R, Liu X, Li X, Islam R, et coll. Effectiveness of Direct Pulp Capping Bioactive Materials in Dentin Regeneration: A Systematic Review. *Materials (Basel)*. 2021; 14(22): 6811.
32. Niladri M, Babacar T, Rachida A. Vital Pulp Therapy: Updated Protocol. *Eur J Mol Clin Med*. 2020; 7(10): 2515-8260.
33. Ouni M, Kallel I, Douki N. Direct pulp capping of carious immature tooth using bioactive material: A case report. *SAGE Open Med Case Rep*. 2022; 10: 2050313X221087565.
34. Parikh M, Kishan K, Shah N, Parikh M, Saklecha P. Comparative evaluation of biodentine and endosequence root repair material as direct pulp capping material: A clinical study. *J Conserv Dent*. 2021; 24(4): 330-335.
35. Paula A, Laranjo M, Marto C, Paulo S, Abrantes A, Fernandes B, et coll. Evaluation of dentinogenesis inducer biomaterials: an in vivo study. 2019; 28: e20190023.

36. Priti D, Desai P, Sampurna D, Gupta S, Chatterjee S, Mondol P, et coll. Direct Pulp Capping Materials: A Review. *World J Pharm Res.* 2019; 8(9): 325-335.
37. Raoof M, Vazavandi E, Parizi M, Hatami N, Mohammadalizadeh S, Amanpour S, et coll. Clinical, radiological, and histological correlation in diagnosis of pulpitis. *Dent Res J (Isfahan).* 2022; 19: 25.
38. Reis M, Scarparo R, Signor B, Bolzan J, Steier L, Figueiredo J. Pulp capping with mineral trioxide aggregate or Biodentine: a comparison of mineralized barrier formation and inflammatory and degenerative events. *Braz. oral res.* 2021; 35: e118.
39. Roberts H, Toth J, Berzins D, Charlton D. Mineral trioxide aggregate material use in endodontic treatment: A review of the literature. *Dent Mater.* 2008; 24(2): 149-164.
40. Roma M, Gupta R, Hedge S. A prospective clinical study with one year follow up of deep caries management using a novel biomaterial. *BMC Res Notes.* 2022; 15: 150.
41. Rombouts C, Jeanneau C, Bakopoulou A, About I. Dental Pulp Stem Cell Recruitment Signals within Injured Dental Pulp Tissue. *Dent J (Basel).* 2016; 4(2): 8.
42. Saxena N, Hugar S, Soneta S, Joshi R, Dialani P, Gokhale N. Evaluation of the Treatment Protocols in the Management of Pulpally Involved Young Permanent Teeth in Children: A Systematic Review and Meta-analysis. *Int J Clin Pediatr Dent.* 2022; 15(1): S103-S113.
43. Semennikova K, Pradelle-Plasse N. Les ciments tricalciques. *Réal Clin.* 2016 ; (2) : 16-25.
44. Silva J, Rifane T, Ferreira-Junior A, Alves A, Miron R, Zhang Y, et coll. In Vitro and In Vivo Efficacy of New Composite for Direct Pulp Capping. *Biomed Res Int.* 2021; 2021: 8414577.
45. Song W, Li S, Tang Q, Chen L, Yuan Z. In vitro biocompatibility and bioactivity of calcium silicate-based bioceramics in endodontics (Review). *Int J Mol Med.* 2021; 48(1): 128.
46. Tran X, Salehi H, Truong M, Sandra M, Sadoine J, Jacquot B, et coll. Reparative Mineralized Tissue Characterization after Direct Pulp Capping with Calcium-Silicate-Based Cements. *Materials (Basel).* 2019; 12(13): 2102.

47. Van der Vyver PJ, Potgieter N, Selvan B. Apexogenesis treatment with mineral trioxide aggregate. *S. Afr. dent. j.* 2018; 73(2): 78-82.
48. Vu T, Nguyen M, Sangvanich P, Nguyen Q, Thunyakitpisal P. Acemannan Used as an Implantable Biomaterial for Vital Pulp Therapy of Immature Permanent Teeth Induced Continued Root Formation. *Pharmaceutics.* 2020; 12(7): 644.
49. Xu D, Mutoh N, Ohshima H, Tani-Ishii N. The effect of mineral trioxide aggregate on dental pulp healing in the infected pulp by direct pulp capping. *Dent. Mater. J.* 2021; 40(6): 1373-1379.
50. Yamakawa S, Niwa T, Karakida T, Kobayashi K, Yamamoto R, Chiba R, et coll. Effects of Er:YAG and Diode Laser Irradiation on Dental Pulp Cells and Tissues. *Int J Mol Sci.* 2018; 19(8): 2429.
51. Yang G, Chen Z. Pulp Regeneration: Current Approaches and Future Challenges. *Front Physiol.* 2016; 7: 58.
52. Youssef A, Emara R, Taher M, Al-Allaf F, Almalki M, Almasri M, et coll. Effects of mineral trioxide aggregate, calcium hydroxide, biodentine and Emdogain on osteogenesis, Odontogenesis, angiogenesis and cell viability of dental pulp stem cells. *BMC Oral Health.* 2019; 19: 133.
53. Zafar K, Jamal S, Ghafoor R. Bio-active cements-Mineral Trioxide Aggregate based calcium silicate materials: a narrative review. *J Pak Med Assoc.* 2020; 70(3): 479-504.
54. Zeater B, Abboud S, Hanafi L. Comparison of the Effects of TheraCal LC and Mineral Trioxide Aggregate on Direct Pulp Capping (DPC) Based on Histological Findings. *Cureus.* 2022; 14(5): e25326.
55. Zhu C, Ju B, Ni R. Clinical outcome of direct pulp capping with MTA or calcium hydroxide: a systematic review and meta-analysis. *Int J Clin Exp Med.* 2015; 8(10): 17055-17060.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	9
LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES ABREVIATIONS	12
INTRODUCTION	13
1. Le coiffage pulpaire direct	16
1.1 Définition	16
1.2 Objectifs	17
1.3 Formation d'un pont dentinaire	18
1.4 Cellules souches pulpaires	19
1.5 Indications	21
1.5.1 Effraction pulpaire lors d'une éviction carieuse	26
1.5.2 Lésions carieuses profondes juxta-pulpaires	27
1.5.3 Traumatisme avec exposition pulpaire	27
• Dents permanentes matures	28
• Dents permanentes immatures	28
1.5.4 Exposition pulpaire lors d'une préparation dentaire	29
1.6 Pulpite réversible et pulpite irréversible	30
2. Les matériaux de coiffage	32
2.1 Mode d'action	33
2.2 Les ciments tricalciques.	34
2.2.1 Les ciments <i>Mineral Trioxyde Aggregate</i> (MTA®)	35
• Présentation	35
• Composition	36
• Réaction et temps de prise	36
• Protocole clinique	37
• Avantages	38
• Inconvénients	38
2.2.2 Le ciment Biodentine®	40
	69

• Présentation	40
• Constituants	40
• Réaction et temps de prise	41
• Protocole clinique	42
• Avantages	43
• Inconvénients	44
2.2.3 TheraCal LC	44
• Présentation	44
• Réaction et temps de prise	44
• Composition	45
• Avantages	45
• Inconvénients	45
2.3 L'hydroxyde de calcium	46
• Présentation	46
• Réaction et temps de prise	46
• Avantages	46
• Inconvénients	46
2.4 L'utilisation de ciments d'obturation endodontique en tant que matériau de coiffage pulpaire ?	47
3. Suivi clinique et radiologique d'une dent traitée par coiffage	49
3.1 Succès thérapeutique	49
3.1.1 Définition	49
3.1.2 Suivi clinique	49
3.1.3 Suivi radiologique	50
3.2 L'échec thérapeutique	51
3.2.1 Suivi clinique et radiologique	51
3.2.2 Quelle thérapeutique en cas d'échec ?	51
• Pulpotomie partielle	52
• Pulpotomie complète	53
4. Les particularités du coiffage pulpaire direct sur dents permanentes immatures	54
4.1 Définition	54
4.2 Indications	54

4.3	Objectif du coiffage pour les dents permanentes immatures : l'apexogénèse	55
4.4	Suivi clinique et radiologique d'une dent permanente immature traitée par coiffage	56
5.	Les contre-indications au coiffage direct des dents permanentes	59
5.1	Contre-indications générales	59
5.2	Contre-indications locales	59
6.	Le laser : une thérapeutique alternative ?	61
	CONCLUSION	64